

Aus dem Zahnärztlichen Institut der Universität Zürich, Konservierende Abteilung,
Leiter: Prof. Dr. med. W. Heß

**Die Hydroxylionophorese
im Lichte klinischer, röntgenologischer,
bakteriologischer und pathohistologischer
Untersuchungen**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde der Zahnheilkunde der Medizinischen
Fakultät der Universität Zürich

vorgelegt von

EDOARDO ZETTEL

von Großdietwil (Luzern)

Genehmigt auf Antrag von Prof. Dr. med. W. Heß

ZÜRICH 1953 — BUCHDRUCKEREI BERICHTHAUS



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus dem Zahnärztlichen Institut der Universität Zürich, Konservierende Abteilung,
Leiter: Prof. Dr. méd. W. Heß

**Die Hydroxylionophorese
im Lichte klinischer, röntgenologischer,
bakteriologischer und pathohistologischer
Untersuchungen**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde der Zahnheilkunde der Medizinischen
Fakultät der Universität Zürich

vorgelegt von

EDOARDO ZETTEL

von Großdietwil (Luzern)

Genehmigt auf Antrag von Prof. Dr. med. W. Heß



INHALT

1. Einleitung	5
2. Geschichtliches	
a) Physikalische und chemische Grundlagen	6
b) Therapeutische Ergebnisse	7
3. Die theoretischen Grundlagen	
a) Entstehungsmechanismus der OH-Ionen	11
b) Wanderungsgeschwindigkeit der OH-Ionen	12
c) Entkalkende und lytische Eigenschaften der OH-Ionen	13
d) Bakterizide Wirkung der OH-Ionen	14
e) Wirkung der OH-Ionen auf das lebende Gewebe	19
f) Technik der therapeutischen Applikation	24
g) Stromarten und Apparaturen	29
4. Eigene Untersuchungen	
A. Vorversuche	30
B. Klinische Untersuchungen	32
a) Untersuchungsmaterial und Behandlungsmethodik	32
b) Klinische Resultate und Röntgenbefund	34
C. Bakteriologische Untersuchungen	39
a) Die bakteriologischen Anfangsversuche	39
b) Die bakteriologischen Schlußversuche	42
D. Histologische Untersuchungen	44
5. Schlußbetrachtung	45
6. Literaturverzeichnis	47

Curriculum vitae

Geboren wurde ich am 20. Januar 1926 in Locarno. In Bellinzona besuchte ich die Primarschulen, die Maturitätsprüfung bestand ich im Jahre 1945 am Liceo Cantonale in Lugano. Im gleichen Jahr ließ ich mich an der Universität Zürich immatrikulieren, wo ich alle meine Semester absolvierte. Die eidgenössische Fachprüfung bestand ich im Herbst 1950. Von November 1950 bis Mai 1952 war ich Assistent an der Konservierenden Abteilung des Zahnärztlichen Institutes der Universität Zürich. Seither bin ich in einer Privatpraxis als Assistent tätig.

Die Hydroxylionophorese im Lichte klinischer, röntgenologischer, bakteriologischer und pathohistologischer Untersuchungen

von *Edoardo Zettel*

1. Einleitung

Obwohl man in der konservierenden Zahnheilkunde durch Frühbehandlung kariöser Defekte, Überkappung und Vitalamputation der Pulpa die Zahl der Wurzelbehandlungen zu vermindern trachtet, steht der Zahnarzt täglich vor dem Problem der einwandfreien Versorgung eines infizierten Wurzelkanals. Der Erfolg konservierender Behandlung oder des Kronen- oder partiellprothetischen Ersatzes ist, abgesehen von der technischen Ausführung, in solchen Fällen vom Erfolg der Wurzelbehandlung abhängig. Die Wichtigkeit und die Schwierigkeit einer solchen Behandlung führten zu einem kontinuierlichen Suchen nach besseren Wurzelbehandlungsmethoden und nach Medikamenten, die zu besserem Erfolg verhelfen sollen. In Amerika untersucht man neuerdings wieder die Fragen einer kunstgerechten Wurzelbehandlung. Ihr Schwergewicht liegt aber heute bei den überseeischen Kollegen in der vielversprechenden Anwendung von Antibiotika.

Nach dem Krieg wurde in Europa die Forderung nach einer einfachen und schnellen Wurzelbehandlungsmethode infolge der Nachkriegsschwierigkeiten und der Sozialversicherung aktuell.

Dr. *Bernard* ist es zu verdanken, daß auf dem Gebiet der Ionophorese weitere Fortschritte theoretischer Natur gemacht wurden. Diese neuen Theorien, welche eine abgekürzte Wurzelbehandlung durch die Hydroxylionophorese empfehlen, fanden in Deutschland einen durch die Kassenpraxis geschaffenen günstigen Widerhall und wurden dort, durch wissenschaftliche Untersuchung gestützt, in die tägliche Praxis eingeführt.

Auch in der Schweiz, wo bekanntlich die Ionophorese in allen ihren Formen und Möglichkeiten schon seit Jahren zur Untersuchung und zur Anwendung kam, interessierte man sich für die neuen Aspekte der Hydroxylionophorese, vermißte aber bis heute eine genauere Kontrolle dieser Methode in bakteriologischer und

pathohistologischer Richtung. Es ist deshalb hier ein Versuch unternommen worden, diese Lücke im Rahmen dieser Dissertation auszufüllen, speziell auch, um eine Parallele mit der am Zürcher Institut seit 30 Jahren bewährten Walkhoff-Methode ziehen zu können.

2. Geschichtliches

a) *Physikalische und chemische Grundlagen*

In den verschiedenen Arbeiten, die in den letzten Jahrzehnten auf dem Gebiet der Ionophorese veröffentlicht wurden, finden wir ausführliche Angaben über die Anfänge und Entwicklung dieser Methode. Ich möchte sie hier kurz zusammenfassen, um die wichtigsten Ergebnisse unterstreichen zu können.

*Castagnola*¹ berichtet, daß bereits im Jahre 1859 eine Anästhesierung des Zahnfleisches mit dem galvanischen Strom durch *Richardson* versucht wurde. Weitere Versuche in dieser Richtung unternahmen *Munk* (1873) und *Gärtner* (1889), um Medikamente in den Körper einführen zu können. Im Jahre 1888 erfolgte bereits die erste Applikation im Wurzelkanal durch *Weiser* in Europa und *McGrath* in Amerika. Die erste fundamentale Anwendung des elektrischen Stromes als Wurzelbehandlungsmittel verdanken wir aber Dr. *Pont*², der schon 1899 eine eingehende Beschreibung einer Behandlung infizierter Wurzelkanäle zusammenstellte. *Tritschler*³ veröffentlichte 1923 eine größere Arbeit, in der die Streitfrage Diffusion oder aktiver Transport eines Medikamentes durch den elektrischen Strom zugunsten des letzteren entschieden wurde. Zu dieser Zeit befaßten sich auch amerikanische Autoren mit dem Problem, sie sprachen aber von Elektrosterilisation und Elektromedikation, was die wichtigste Erscheinung der Ionophorese nicht genügend hervorhob (*Appleton* und *Großmann*). Dr. *Bernard* (1929)⁴ verdanken wir die erste Richtigstellung über den zweigeteilten Ablauf des physikalisch-chemischen Vorganges. Er bewies *in vitro* und *in vivo*, daß durch die Ionophorese Jodionen in therapeutischer Menge in Dentin und Periapex transportiert werden.

In der Folge befaßten sich österreichische und schweizerische Autoren mit der Aufklärung wichtiger Teilfragen. *Kellner*⁵ untersuchte die Ionengeschwindigkeit in Haupt- und Seitenkanälen und berichtet darüber, daß das Lumen keinen Einfluß auf die Geschwin-

digkeit, wohl aber auf die transportierte Menge hat. Als Medikament brauchte er Jodionen, deren Wanderungsgeschwindigkeit 3 mm/min beträgt: ein Kanal von 1,2 cm Länge wird somit in einer Sitzung von 20 Minuten durchdrungen. *Kellner* empfiehlt lange, zahlreiche Sitzungen mit kleinen Intervallen, wobei die Jodmenge konstant steigt. Aus seiner Untersuchung entnehmen wir weiter, daß die Geschwindigkeit der Ionen mit der Erhöhung der Spannung steigt, mit der Erhöhung der Intensität steigt die Zahl der an der Wanderung beteiligten Ionen. Da die Feldstärke mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, empfiehlt *Bleichsteiner*^{6, 7} die Doppelelektrode nach *Ostiller*, die beide Pole im Kanal vereinigt. Durch *Adler* und *Pace*⁸ wird die Doppelelektrode als unzulänglich bezeichnet. *Prader*⁹ gelang der Nachweis einer gewissen Dentinleitung, besonders bei undurchgängigem Hauptkanal. Nach ihm sind diejenigen Zähne am meisten für eine Ionophorese indiziert, bei denen die Gesamtoberfläche im Verhältnis zum Kanalquerschnitt möglichst groß ist, das heißt bei langen, dünnen Wurzeln. Aus der Arbeit von *Schenker*¹⁰ entnehmen wir, daß ihm der Nachweis der transportierten Ionen durch Farbmethode gelungen ist. Wichtig noch ist die Behauptung, daß er keine in ionophoretischem Sinne undurchgängigen Kanäle feststellen konnte und daß der elektrische Strom allein keine Wirkung auf Bakterien entfaltet. In dieser Richtung unterrichtet uns auch die Arbeit von *Schudel*¹¹, der mit Cibazol als Therapeutikum arbeitete, dessen Nachweis in den apikalen Verzweigungen und in den Dentinkanälen gelang. Die Arbeiten *Abt*¹² mit Cibazol und *Martinet*¹³ mit Merfen bestätigen diese Resultate.

b) Therapeutische Ergebnisse

*Tritschler*³ veröffentlichte günstige Resultate bei Behandlung einzelner Zähne mit konzentrierten Jodionen, zitronensaurem Silber, kolloidalem Ag+Hg und Silbernitrat.

*Schacke*¹⁴ berichtet bereits von 75 Fällen, die er mit Itois (*Bernard*) als Medikament bei einer Applikation von 90–100 mA/min behandelt hat. Er untersuchte bakteriologisch das Dentin von 39 Zähnen und fand 36 sterile Befunde.

*Holzach*¹⁵ begann ähnliche Versuche an 27 Zähnen, die er aber 3 Monate nach der Behandlung bakteriologisch und röntgenologisch untersuchte. 89% des Dentins, 43% des Alveolengrundes wurden

steril befunden, die Röntgenaufnahmen zeigten aber nur eine geringfügige Verkleinerung der Herde.

*Schenker*¹⁰ behandelte und kontrollierte 47 Zähne. Als Elektrolyt brauchte er Jodjodkali bei 21 Fällen und Cibazolösung bei 26 Fällen. Bereits nach 4 Monaten konnte er eine röntgenologisch sichtbare Heilung feststellen, die bei der zweiten Gruppe, mit Calxyl als Wurzelfüllung, deutlicher als bei der ersten mit Jodoformzement als Wurzelfüllung sichtbar war. *Schenker* stützte seine Behauptungen auf pathohistologische Schnitte, die eine deutliche Heilungstendenz zeigten. Die bakteriologischen Resultate waren, infolge technischer Schwierigkeiten bei der Materialentnahme, nicht absolut eindeutig.

*Forster*¹⁶ berichtet ebenfalls von guten Resultaten bei Verwendung von Iтроis, appliziert in zwei Sitzungen von insgesamt 50 mA/min.

*Müller*¹⁷, ebenfalls mit Iтроis, erhöhte die Stromdosis bis auf 110 mA/min und füllte dann mit Elfenbein. Von 18 Fällen wiesen 15 steriles Dentin auf.

*Schudel*¹¹ untersuchte speziell die Heilungsaussichten der Jodjodkali- und Cibazolionophorese bei höherer Stromdosis (140 mA/min in 2 bis 3 Sitzungen) und längerer Beobachtungszeit. Seine pathohistologischen Kontrollen ergaben vielversprechende Resultate.

Professor *Heß*^{18, 19, 20}, unter dessen Leitung die größere Zahl der Arbeiten auf dem Gebiete der Ionophorese entstanden ist, stellte 1942–1943 fest, daß mit Hilfe der Ionophorese antiseptische Lösungen in die schwer zugänglichen Teile der Hartschubstanz sowie in die Weichteile transportiert werden können. Empfohlen wurde, auf 2 bis 3 Sitzungen verteilt, eine Gesamtdosis von 150–180 mA/min. *Abt*¹² behandelte 25 beherdete Zähne mit Cibazol bei 140–150 mA/min. Als Wurzelfüllung kam die Paste von *Champion*, ferner eine Granulompaste mit Knochenpulver, Cibazol und Kalziumglukonat zur Anwendung. 14 Herde zeigten eine Verkleinerung. Die histologischen Präparate zeigten günstige Heilungstendenz der Herde.

Die Arbeit von *Fuchs*²¹, bei der 18 Zähne zur Untersuchung kamen (Cibazolösung, 150–200 mA/min, in 3 Sitzungen), bewies die Schwierigkeiten der Dentin- und Granulomsterilisation, ferner die Unzulänglichkeit der Entnahmetechnik. 14 Zähne und 16 Granulome wurden keimhaltig gefunden. *Castagnola*¹ betonte, daß die

bisher gebrauchten Strommengen und Medikamente auf klinischer Empirie beruhen. Mit den verschiedensten Untersuchungsmethoden wurden zwar Erfolge, aber auch eindeutige Mißerfolge festgestellt. Er untersuchte die Ionophoresenmöglichkeit und die bakterizide Wirkung folgender Medikamente: Natrium-Cibazolilösung 20% und 40%, Elkosin, Jodjodkali KJ_2 , Itrois KJ_3 , Merfen und Desogen 1%. Er stellte anhand von 600 Messungen in vitro fest, daß die Wirkung obiger Medikamente auf Reinkulturen von Gangränbakterien und deren Gemische vom Produkt der Stromstärke und Einwirkungszeit abhängig ist. Die Chemotherapeutika wirkten bei Anwendung von 175–300 mA/min keimtötend, die Antiseptika dagegen in radikalerer Weise schon bei Anwendung von 175–225 mA/min. Es wurde keine Wanderung der negativgeladenen Bakterien festgestellt. Omnipotente Wirkung gegenüber den untersuchten Keimen und deren Gemischen zeigten nur Desogen und Merfen, letzteres kommt aber für die Ionophorese mangels Transportfähigkeit nicht in Frage.

Im Jahre 1947 brachte *Bernard*²² durch seine originelle Publikation in «L'Odontologie» neue Anregungen auf dem Gebiete der Ionophorese. Er beschreibt die neue Methode mit dem schnelleren OH-Ion und verspricht sich dadurch eine in der Behandlung der Gangrän noch nie erreichte Erfolgssicherheit. Er betont, daß die schweizerischen Forscher wohl die Ionophorese in allen Details und Aspekten untersucht haben, die empfohlenen langen Applikationszeiten sperrten aber der Ionophorese den Einzug in die tägliche Praxis. Er vereinfachte die Technik, so daß die Ionophorese die Methode der Wahl bei der Wurzelbehandlung werden sollte: die wesentliche Neuerung war das Fehlen jedes Medikamentes, die kurze Einwirkungszeit und die Tatsache, daß der sterilisierte Kanalinhalt als Bestandteil der Wurzelfüllung an Ort und Stelle belassen werden konnte. Er betonte, daß die Seitenkanäle allein durch die Ionophorese erfaßt werden können, so daß auch dieser, nach seiner Auffassung, die Ausheilung der Granulome hemmende Faktor endgültig ausgeschaltet wurde. Die rein klinischen Resultate genügten *Bernard* als Beweise seiner Methode.

In Deutschland wurde aus den schon erwähnten Gründen die OH-Ionophorese mit großer Aufmerksamkeit untersucht. *Wolff*²³, der schon bei der Untersuchung der «alten» Ionophorese Erfahrun-

gen auf diesem Gebiete gesammelt hatte, stellte die neue Methode der deutschen Zahnärzteschaft vor. Er empfahl aber die mechanische Erweiterung der Kanäle und eine Wurzelfüllung mit Silbervioformzement anstatt Zitronellol, wie *Bernard* angegeben hatte.

Im Sommer 1950 veröffentlichte *Wolf*²⁴ bereits die Resultate klinischer und röntgenologischer Nachkontrollen: bei 178 Zahneinheiten waren von vornherein nur zwei Mißerfolge zu beobachten. Sie fielen, nach Angaben des Autors, der Methode nicht zur Last. Von 78 nachkontrollierten Gangränfällen ergaben

75,64 % normale
20,51 % verzögerte
3,84 % ausgebliebene Ausheilung.

Zusammenfassend spricht *Wolf* von 97 % Erfolgen.

In der Folge äußerten sich Kliniker und Praktiker über die Ionophorese.

*Hufnagel*²⁵ berichtet von 76 Zähnen, die mit der Methode von *Bernard-Wolf* behandelt wurden. Die Dosierung schwankte zwischen 3,3 bis 14 mA min, je nach der röntgenologischen Ausdehnung des Herdes. Nach der Ionophorese legte er eine provisorische Füllung mit Calxyl bis zur beginnenden Verkleinerung des Herdes, dann eine Wurzelfüllung mit Guttapercha. Er stellte in allen Fällen eine Verkleinerung des Herdes fest.

*Pohl*²⁶ legte in den erweiterten Kanal Calxylmilch, um eine erhöhte Menge von OH-Ionen transportieren zu können. Nach bakteriologischer Feststellung der Unzulänglichkeit der Bernardschen Dosierungen schlägt er folgende vor: 9–14 mA min bei ar-Fällen ohne Herd, 14–25 bei ar-Fällen mit Granulom.

*Kristen*²⁷ teilt die Behandlung in zwei Sitzungen, bei der 6–8 mA min appliziert wurden, auf. Als Einlage zwischen den sich in einem Abstand von 2 bis 3 Tagen folgenden Sitzungen legte er eine Papierspitze mit alkalischem Kamillosept. Bei 56 kontrollierten behandelten Zähnen fand er nach 5 bis 9 Monaten 27 ausgeheilte oder in Heilung begriffene, 22 unverändert gebliebene, 7 vergrößerte Herde. Er faßt seine Resultate mit einer Erfolgsquote von 61 % zusammen.

In den Angaben von *Hallich*²⁸ finden wir einen Kurzbericht über die Resultate verschiedener deutscher Kliniken; es fehlen genauere

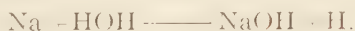
Angaben über Strommengen und Beobachtungszeit. *Halle* berichtet, daß 6% der behandelten Fälle eine sich anbahnende ostitische Ausheilung zeigten; *Heidelberg* untersuchte 56 mit Herden behaftete Zähne: 27 davon zeigten eine Ausheilung, 22 keine Veränderung und 7 eine sichtbare Vergrößerung des Granuloms. Der Verfasser betont, daß überall die Stromdosen von *Bernard-Wolf* als ungenügend beachtet werden.

3. Die theoretischen Grundlagen

a) Entstehungsmechanismus der OH-Ionen

Die theoretischen Grundlagen der OH- oder Hydroxylionophorese verdanken wir *Bernard*. Von der Tatsache ausgehend, daß die Iono-phorese als einzige Methode die gründliche Erfassung aller Markkanäle und apikalen Verästelungen erlaubt, aber in der üblichen Applikationsform mit zu vielem Zeitaufwand verbunden ist, versuchte er eine Vereinfachung und Beschleunigung der Methode zu erreichen und diese als Methode der Wahl in der Wurzelbehandlung einzuführen. Seine Ausgangsüberlegungen sind denkbar einfach und entstanden als Zufall bei einer morphologischen Studie der apikalen Ramifikationen.

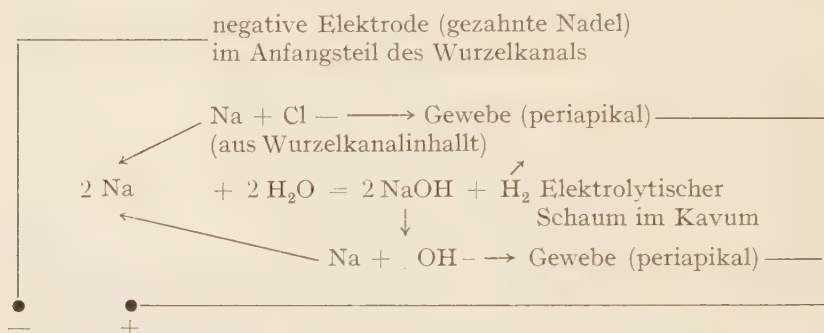
Im infizierten Kanalinhalt, wie allgemein im menschlichen Körper, ist NaCl im dissoziierten Zustand (Arrhenius) reichlich vorhanden. Wenn wir den negativen Pol mit dem Kanalinhalt in Kontakt setzen, den positiven mit einer Stelle an der Haut, und einen Gleichstrom hindurchfließen lassen, so wandern die Ionen, die sich im Kanalinhalt befinden, nach den bekannten Gesetzen, je nach ihrer Ladung, dem einen oder dem andern Pol zu. In unserm speziellen Fall wandern die negativ geladenen Cl-Ionen vom Kanalinhalt via Apex in den Körper hinein, die positiv geladenen Na-Ionen dem negativen Pol im Anfangsteil des Kanals zu. Die Na-Ionen verlieren durch Kontakt mit dem — Pol ihre Ladung und reagieren sofort mit dem vorhandenen H_2O :



NaOH als starke Lauge zerfällt sofort in Na^+ und OH^- . Die OH^- -Ionen, die negativ geladen sind, ersetzen den am Anfang stattfindenden Cl-Ionenstrom, während die freigewordenen Na-Ionen im Kontakt mit Wasser wieder NaOH bilden.

Es findet somit eine Anreicherung an OH-Ionen statt, die den ganzen Kanalinhalt und Periapex alkalisieren sollten. Die freigewordenen H-Ionen entweichen aus der Pulpakammer in Gasform unter Bildung des elektrolytischen Schaumes.

Die Entstehung der OH-Ionen kann man im folgenden Schema nach *Dimmling* und *Lutz*²⁹ skizzieren.



Diese OH-Ionen, die, wie wir später sehen werden, therapeutisch aktiv sind, entstehen also ohne jeglichen Zusatz von Medikamenten: das ist die erste Neuerung der neuen Ionophoresetechnik! *Knappwost*³⁰, der die physikalisch-chemische Seite der OH-Ionophorese am gründlichsten untersucht hat, ist mit diesen Angaben nicht einverstanden. Die OH-Ionen, die bei der Ionophoresebehandlung entstehen und wandern, stammen, nach seiner Auffassung, aus dem durch den elektrischen Strom in seine Komponenten gespaltenen Wasser, das als Lösungsmittel im Kanal vorhanden ist.

b) Wanderungsgeschwindigkeit der OH-Ionen

Die OH-Ionen unterscheiden sich von den anderen durch ihre größere Wanderungsgeschwindigkeit. *Bernard*²² behauptet, daß die OH-Ionen fünfmal schneller als die J3-Ionen wandern, was für eine wesentliche Verkürzung der Behandlung spricht.

*Paszner*³¹ dagegen bestimmte für die OH-Ionen eine Geschwindigkeit, die dreimal größer ist als diejenige der J-Ionen. *Wolf*²⁴ versucht diese Diskrepanz damit zu erklären, daß *Bernard* die Messung an J3, *Paszner* an J ausgeführt hat.

Vidor³² ermittelte sogar an Modellversuchen den zurückgelegten Weg in der Zeiteinheit:

OH 0,001802

J 0,000566 cm/sec bei konstanter Spannung.

Die Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen ist von der Feldstärke abhängig, letztere ihrerseits vom Abstand der Elektroden. Diese Tatsachen in Betracht ziehend, versuchten *Rheinwald* und *Mayer*³⁴, die Wanderungsgeschwindigkeit zu ermitteln; sie haben angenommen, daß der Spannungsabfall 1 V/cm beträgt, und daß er im Körper gleichmäßig ist. Bei einer Entfernung Zahn-Hand (es kam die Handelektrode zur Anwendung) von 100 cm und einer apparaturbedingten Spannung von 60 Volt fanden die obengenannten Autoren, daß in der Zeit von 5 Minuten ein OH-Ion einen Weg von 0,33 cm zurücklegt.

*Knapppost*³⁰ bestimmte mit verschiedenen Messungen, daß die OH-Ionen dreimal schneller als allgemein andere Ionen sind. Diese Eigenschaft ermöglicht die Verkürzung der Behandlungszeit, da die OH Ionen in einigen Minuten den ganzen Kanalinhalt samt Ramiifikationen erreicht haben.

c) Entkalkende und lytische Eigenschaften der OH-Ionen

Bernard behauptet weiter in seiner Publikation, daß die OH-Ionen eine Spaltung der Eiweiße, eine Verseifung der Fettsäuren und eine Lockerung der Kalksalze der Kanalwand bewirken: er spricht von einem «alésage électrochimique», indem die Kalksalze ihre kristallinische Struktur verlieren. Er empfiehlt bei unauffindbaren Kanaleingängen, damit diese chemische Gangbarmachung zustande kommt, daß man einen Wattebausch mit 20% NaOH ins Kavum lege und eine kurze Ionophorese appliziere. Diese Behauptung fand dann bei späteren Versuchsreihen keine überzeugende Bestätigung.

*Scheufler*³⁵, *Singer*³⁶, *Rheinwald* und *Mayer*³⁴, *Pohl*²⁶, *Kristen*²⁷, *Hufnagel*²⁵, die diese mögliche Erweiterung der Wurzelkanäle kritisch untersuchten, konnten eine solche nicht beobachten. Einzig *Büchs*³³ konnte anhand von einfachen Beobachtungen an 166 Zähnen in 11,4% der Fälle eine bessere Gängigkeit der Wurzelkanäle nach OH-Ionophorese feststellen.

d) *Bakterizide Wirkung der OH-Ionen*

Die wichtigste Eigenschaft der OH-Ionen ist ihre bakterien-tötende Wirkung. *Bernard* behauptete 1947, daß die von ihm angegebenen Strommengen nicht nur die Abtötung aller Bakterien des Kanals und Granuloms bewirkten, sondern auch die Bakterienleiber auflösten. Er empfahl folgende Applikationswerte: Für einen einwurzligen Zahn ohne Granulom 2 décicoulombs = 3,3 mA/min, für einen einwurzligen mit kleinem Granulom 4 décicoulombs = 6,6 mA/min, für einen Einwurzligen mit großem Granulom 6 décicoulombs = 10 mA/min. Es wird allgemein angenommen, daß bei der Überschreitung gewisser pH-Werte, sei es nach der sauren als auch nach der alkalischen Seite, die Bakterien in ihren Existenzmöglichkeiten gehemmt werden.

*Lenfant*⁴⁵ gibt folgende Grenzwerte und Optima an:

Typhus bac.	3,7–8,2	Optimum 7,0
Coli bac.	4,6–9,5	Optimum 7,0
Diphtherie bac.	6,0–8,5	Optimum 7,7
Streptokokken	5,0–8,2	Optimum 6,7
Staphylokokken	3,2–8,1	Optimum 6,5.

Interessant ist das Verhalten der Leukozyten, die zwei Optimumzonen besitzen:

zwischen 4,5–6,5 und
8,5–9,0.

Eine Bakterienabtötung können wir, rein pH-technisch, durch Säurewerte unter 3 oder durch basische Werte oberhalb 9 erreichen. Das unliegende Gewebe wird aber leichter ein pH 9 als ein pH 3 ertragen.

Die von *Bernard* angegebenen auffallend kurzen Behandlungszeiten mußten in ihrer bakteriologischen Wirksamkeit überprüft werden. Ähnlich wie *Castagnola*¹ für die antiseptische und chemotherapeutische Ionophorese untersuchten *Dimmling* und *Lutz*²⁹ die bakterizide Wirkung der OH-Ionen in vitro. Sie wußten die Schwierigkeiten, die bei einer Materialentnahme in vivo immer auftreten, durch eine Phantomanordnung in vitro zu lösen. Da alle Versuche mit Glaskapillaren infolge Gasbildung mißlungen waren, gingen sie zum hülsenlosen Agarfaden über, den sie aus einer mit Bakterien übergossenen Agarplatte ausgeschnitten hatten. Der Agarfaden

wies einen Querschnitt von 1 mm² auf und wurde in einer Länge von 10 mm zwischen den Elektroden fixiert. Der Widerstand dieses Agarfadens wurde zwischen 5000 und 9000 Ohm gemessen, er sank aber während des Versuches infolge Ionenansammlung und Befeuchtung des Fadens ab. Als höchste Temperatur bei einer Intensität von 5 mA und einer gesamten Strommenge von 1500 mA/min wurden 37° Celsius gemessen. Im Agarfaden wurde eine Bakterienkonzentration gewählt, die in vivo kaum anzutreffen ist. Es kam einheitlich eine Stromintensität von 5 mA zur Anwendung.

Die Resultate:

1. Gram-Stäbchen wurden durch 5 mA/min getötet. Einwirkungszeit $\frac{1}{2}$ bis 1 Minute.
2. Bakteriophagen als Virusart wurden ebenfalls durch 5 mA/min getötet.
3. Grampositive Kokken und Sarcine, hämolisierende Streptokokken durch eine Dosis von 3–4 mA/min getötet.
4. Pneumokokken durch 10–15 mA/min getötet.
5. *Staphylococcus pyogenes albus haemolyticus* durch 20–25 mA/min getötet.
6. Diphtherie und Pseudodiphtheriebakterien durch 5–10 mA/min getötet.
7. Tuberkulosebakterien durch 70–100 mA/min getötet.
8. Sporenhaltige Bakterien zeigten eine hohe Resistenz. Tetanus-erreger waren nach 200 mA/min noch lebend, Milzbrand noch nach 1500 mA/min.

Die Autoren konnten noch feststellen, daß die Dosis letalis von der Konzentration der Bakterien im Agarfaden stark abhängig war. Es ergibt sich daraus, daß die Stromdichte ebenfalls von Bedeutung sein muß: Überall an den Ringpässen hat man eine erhöhte Stromdichte, was einer erhöhten Desinfektionskraft entspricht. Das lehrt uns, daß von einer Trepanation des Apex absichtlich Abstand genommen werden muß, um die Stromverteilung im Delta apicale und in den Markkanälen nicht zu stören.

Nach diesen Versuchen wurden die Agarfäden mikroskopisch untersucht, um die von *Bernard* angegebene Bakteriolyse kontrollieren zu können. Die Autoren konnten diese Annahme nicht bestätigen; obwohl die Bakterien nach Überimpfung kulturell nicht mehr nach-

zuweisen waren, ließen sie sich noch färben und mikroskopisch feststellen.

Eine andere Frage, die an dieser Stelle aktuell wird, ist die elektrische Ladung der Bakterien selber. Untersuchungen in dieser Richtung zeigten, daß selbst unter den gleichen Arten quantitative Unterschiede vorhanden sein können (*Karczag*³⁸). Allgemein wird aber angenommen, daß die meisten Bakterien geladen sind, da sie meistens der $+$ -Elektrode zuwandern. Es folgt daraus, daß während unserer OH-Ionophorese Mikroorganismen durch den Apex in das umliegende Knochengewebe transportiert werden; da aber dieser Transport im OH-Strom stattfinden muß, nehmen die meisten zur Ionophorese positiv eingestellten Autoren an, sie würden dadurch vernichtet. Anders verhalten sich diejenigen Bakterien, die $--$ -geladen sind; sie wandern vom Periapex in den Wurzelkanal hinein, wo sie im Kontakt mit der $---$ -Elektrode umgeladen und dadurch getötet werden. Nach *Dimmling* und *Lutz* erklärt sich durch die Umladung auch die bakterizide Wirkung einer OH-Ionenkonzentration, die die sogenannte Vitalgrenze der Bakterien überschreitet: Sie sind mit dem Medium nicht mehr isoelektrisch, so daß sie einer Agglutination unterworfen sind.

*Knapppost*³⁰ nimmt auch zu dieser Frage Stellung: Er und seine bakteriologischen Mitarbeiter stellten einen amphoteren Charakter der Bakterien fest. Im alkalischen Milieu reagieren sie ebenfalls alkalisch, so daß sie unter der Einwirkung des Stromes körperwärts wandern. Sie wandern zwar nach den Messungen von *Knapppost* mit der gleichen Geschwindigkeit wie die OH-Ionen, so daß sie, bevor sie von der tödlich wirkenden OH-Konzentration erreicht sind, bereits ins periapikale Gewebe transportiert werden. Um diesem Nachteil entgegenzutreten, empfiehlt er vor der Ionophorese eine sogenannte Saugphase. Durch Einfüllen einer schwachen Säure in den Kanal polen sich die sich amphoter verhaltenden Bakterien positiv, so daß sie bei der anschließenden Ionophorese von der ihm Zahn liegenden $---$ -Elektrode angezogen werden. Durch Umladung erfolgt dann ihre Abtötung.

Anhand dieser bakteriologischen Resultate kann ersehen werden, daß die von *Bernard* angegebenen Strommengen ungenügend sind, oder anders formuliert, daß sie keine Gewähr für eine sichere Abtötung aller Gangränbakterien geben. Außerdem ist die Versuchs-

anordnung von *Dimmling* und *Lutz* nicht in allen Punkten den Verhältnissen in vivo ähnlich. Die Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen ist von der Feldstärke abhängig, letztere ihrerseits vom Abstand der Elektroden. In der obenerwähnten Versuchsanordnung sind die Elektroden in einem Abstand von 10 mm, was in vivo niemals möglich sein kann. Bei den Versuchen, in denen die +-Handelektrode zur Anwendung kommt, ist noch der Körperwiderstand in Betracht zu ziehen, wobei man besonders auf den großen Widerstand der Haut hinweisen muß. Interessant sind die Untersuchungen von *Prader*⁹ in dieser Richtung. An Messungen, die er mit einer besonderen Apparatur am Patienten und am extrahierten Zahn ausgeführt hat, fand er, daß der Kanalwiderstand größer ist als der Widerstand Zahn-Hand. Er erklärte diese Diskrepanz dadurch, daß der Zahn im Körperstromkreis nicht nur in Serie, sondern auch in Parallelschaltung angeschlossen ist. Praktisch und wichtig für unsere Betrachtungen sind die gefundenen Werte für den Abschnitt Zahn-Hand; sie schwanken zwischen 9–20 kOhm.

Obwohl *Knappecost*¹⁶ mit den mathematischen Ergebnissen von *Rheinwald* und *Mayer* nicht einverstanden ist, ist er mit diesen Autoren doch darüber einig, daß die desinfektorische Kraft der OH-Ionophorese in den von den meisten Autoren angegebenen Zeiten ungenügend ist, obwohl die Strommengen in der letzten Zeit fast verdoppelt wurden. Nach *Rheinwald* und *Mayer* sind die Ströme, die in der Ionophorese zur Anwendung kommen, nicht genügend, um eine Umladung der Bakterien zu gestatten. Sie bestimmten, daß bei einem pH-Wert von 13 die Konzentration des Kanalinhaltcs an NaOH 0,4% beträgt. Sie machen auf die Tatsache aufmerksam, daß der pH-Wert allein für eine Bakterienabtötung nicht genügt, da die Mikroorganismen gegen verdünnte Alkalien ziemlich resistent sind. Vergleichsweise gaben sie folgende Versuchsergebnisse an:

Staphylokokken wurden erst nach 10 Minuten in einer 4%-NaOH-Lösung vernichtet, Milzbrandbazillen dagegen waren nach 45 Stunden noch intakt. Sie sprechen der Versuchsanordnung von *Dimmling* und *Lutz* jede praktische Bedeutung ab, weil die Bakterien dank ihrer Eigenladung aus dem Agarfaden hinausgewandert sein können. Sie fanden aber in Vivoversuchen folgende Resultate: Es kamen insgesamt 99 Zähne zur Behandlung mit Stromdosen bis 30 mA/min. Ein Abstrich aus dem Kanal mit einer sterilen Papier-

spitze ergab in 75 Fällen einen sterilen Befund. Die Autoren versuchen diese Ergebnisse dadurch zu erklären, daß infolge Kataphorese und Schaumwirkung eine Ausschwenkung der Bakterien aus dem Wurzelkanal erfolgt!

Gegenüber der bakteriziden Wirkung der Ionophorese ist auch *Proell*³⁹ skeptisch: Er und seine Assistenten konnten eine solche nur bei einer für den Patienten ohne Anästhesie unerträglichen Stromstärke von 5 mA feststellen. Es wäre zu bemerken, daß diese Intensität die gleiche ist, die von *Dimmling* und *Lutz*²⁹ in ihrer Versuchsanordnung angewendet wurde. Er behauptet weiter, daß der Zeitfaktor nicht außer acht gelassen werden darf, wie schon *Knappwost* angegeben hat. Unbeeinflusste Bakterien fand *Proell* auch am Apex von mit Ionophorese behandelten Zähnen. *Schlottmann*⁴⁷ berichtet, daß eine wirksame Bakteriozidie nur an den engsten Teilen des Wurzelkanales anzutreffen ist, das heißt dort, wo wir eine erhöhte Stromdichte haben. Die gleiche Zurückhaltung in bezug auf Bakterienabtötung finden wir auch in einer Publikation von *Heiß*⁴⁸, der den OH-Ionen bloß eine bakteriostatische Wirkung zumutet. Er betont weiter, daß Metallionen aus den Elektroden an der Wanderung teilnehmen. Diese entfalten eine Wirkung, die er unterstützen will, indem er Cu- oder Ag-Elektroden braucht.

Mit dem heiklen Problem einer bakteriologischen Untersuchung befaßte sich auch *Pohl*²⁶, der nach 2 Sitzungen von 9 bis 25 mA min, je nachdem der zu behandelnde Zahn granulomtragend war oder nicht, sterile Papierspitzen in den Kanal legte. Sie wurden nach 24 Stunden entfernt und kulturell untersucht. Von 53 Papierspitzen waren nur 17 steril. *Kristen*²⁷ untersuchte 38 Zähne, die mit 2 Ionophorese-sitzungen behandelt wurden; in der Zwischenzeit von 2 bis 3 Tagen legte er eine alkalische Kamillosepteinlage, um die Wirkung der OH-Ionen zu unterstützen. Mit der Papierspitze machte er dann einen Abstrich des Kanals und bebrütete ihn in Leberbouillon. Bei 12 Zähnen ergab sich völlige Sterilität, die anderen enthielten noch Keime, und zwar Streptokokken, Staphylokokken, Enterokokken, Keime der Viridansgruppe, *Oidium albicans* und *Pseudodiphtherie*-bakterien. Auf eine Publikation von *Heiß* und *Bräse*⁴⁰ eingehend, die die Eindringungsfähigkeit der OH-Ionen in das Dentin auf $\frac{1}{100}$ mm beschränkt haben, untersuchte *Kristen*²⁷ am extrahierten Zahn die Dentinsubstanz und konnte keine Sterilität beweisen, trotz

Verabreichung von 100 mA min. An dieser Stelle ist die Frage berechtigt, wie weit die Bakterien in das Dentin einzudringen vermögen. *Greve*⁴¹ behauptet, daß die Dentinkanälchen zu klein seien, um das Eindringen der Bakterien zu ermöglichen; *Walkhoff* und *Miller*⁴² sind der Auffassung, daß die Infektion höchstens 10–50 μ in die Dentinkanälchen einzudringen vermag. *Harndt*⁴³ fand am meisten Bakterien im koronarwärts liegenden Wurzelkanalabschnitt, obwohl sie auch in den kleineren Lumina des Sekundärdentins in geringer Tiefe anzutreffen sind. *Prader*⁴⁴ ist der Auffassung, daß bei der Gangrän nach dem Tode der Odontoblasten die Tomeschen Fortsätze zerfallen und geschrumpft sind; die Lebensbedingungen sind für die Bakterien durch eigene Abbauprodukte erschwert, das Wachstum gehemmt. Er hat den Eindruck, daß bei der Gangrän die Dentininfektion nur soweit vordringen kann, als das Kanalexsudat osmotisch einzudringen vermag. Zusammenfassend liegt die Dentininfektion in einem Bereiche, den wir mit der Ionophorese erfassen können. Ich stütze mich bei dieser Behauptung auf die Arbeiten von *Prader*⁹, der am nicht geschliffenen Dentin eine Stromleitung experimentell feststellen konnte, von *Schenker*¹⁰, der im ionophoretischen Sinne keine undurchgängigen Wurzelkanäle finden konnte, und von *Schudel*¹¹, der durch die Färbemethode die Passage des Cibazolions durch das Dentin in das Periodont beobachtete.

e) Wirkung der OH-Ionen auf das lebende Gewebe

Während *Bernard* sich mit der bakteriziden Wirkung der OH-Ionen begnügte und die Heilung der Granulome der Abwehrkraft des Körpers überlassen hat, berichten deutsche Autoren über heilungsbegünstigende Zustände, die durch das Hinaustreten der OH-Ionen in das periapikale Gewebe geschaffen werden.

Die Befürworter der Ionophorese sehen im Hinaustreten der geladenen OH-Ionen in das Gewebe eine Summe von heilungsbegünstigenden Faktoren. So hat *Tietze*⁴⁹ berichtet, daß OH-Ionen eine Umladung der Grenzflächen bewirken, das heißt es wird eine Permeabilität des Gewebes für Kationen geschaffen; das für den Knochenanbau wichtige Ca^{++} -Ion kommt so besser zur Wirkung. Die für denselben Vorgang nötige Phosphatase wird durch den Umstand, daß sie ihre optimale Wirkung bei pH 9 entfaltet, ebenfalls aktiviert.

Nach Büchs³³ kommt es beim Stromfluß durch den menschlichen Körper zu einer Veränderung der Ionenkonzentration an den Grenzflächen. Dies sollte das Durchtreten von Ionen durch Zell- und Organmembranen sowie das Wandern von gelösten Stoffen begünstigen, das heißt eine Änderung des Chemismus der Zellen hervorrufen.

Nach Tietze⁴⁹ ist der menschliche Körper ein durch Membranen getrenntes, kolloidales System, wobei elektrochemische Eigenschaften eine große Rolle spielen, da Kolloidteilchen nur dann existenzfähig sind, wenn sie an der Oberfläche elektrische Ladungen tragen. Jede Zellmembran besitzt eine eigene elektrische Ladung, die gleichgeladene Ionen abstößt; jede Körperzelle ändert mit der Verschiebung des pH ihr Verhalten. Die H⁺- und OH⁻-Ionen sind stärker absorbierbar und bestimmen meistens die Ladung des Diaphragmas gegen die Lösung. Im Falle einer Wurzelbehandlung sollten wir nach Tietze durch unsere Maßnahmen danach streben, den Zustand des ionenmäßig relativen Gleichgewichtes, das heißt der mehr oder minder stationären Entzündung mit ihrer sauren Reaktionslage und ihrer Membran (Leukozytenwall oder Granulom), in einen Zustand des für den Körper ionenmäßig stabilen Gleichgewichtes mit schwach alkalischer Reaktion überzuführen. Durch die meisten unserer Einlagemittel, die schwach sauer reagieren, wie z. B. Chlorphenol, Trikresolformalin und so weiter, werden wohl die Bakterien abgetötet und die Leukozyten herangezogen, der Körper aber wird weder angeregt noch unterstützt, sondern eher mehrbelastet, weil er noch die saure Reaktion des Medikamentes neutralisieren muß.

Nernst⁵⁰ sieht in den chemischen Zustandsänderungen das reizauslösende Moment auf die motorisch sensiblen und vegetativen Fasern: Es kommt zu einer kurzdauernden Kontraktion und anschließend zu einer langdauernden Dilatation der Gefäße, was mit erhöhtem Stoffwechsel, beschleunigter Resorption, vermehrter Phagozytose einhergeht. Kowarschick⁵¹ bezeichnet das als «funktionelle Umstimmung». Auf diese zellfremden Reize antwortet der funktionstüchtige Organismus mit einem Zellanbau. Büchs³³ berichtet über Untersuchungen von Piontkowsky, der die schnellere Regeneration von Nervenfasern an mit galvanischem Strom behandelten Tierextremitäten feststellen konnte. Ähnliche klinische Beobachtungen haben Kosaka und Jzawa⁵² gemacht. Andere Auto-

ren behaupten, daß infolge Druckverminderung im Periapex (Kataphorese als Nebenerscheinung der Ionophorese bewirkt eine Entwässerung) günstige Voraussetzungen für eine klinische Heilung geschaffen werden. *Heiß*⁴⁸ z. B. berichtet, daß im entzündeten Gewebe der osmotische Druck erhöht ist; er kann Werte bis zu 19 at aufweisen (normal 7,5–7,9). Diese Hyperosmie wird durch das Phänomen der Kataphorese wenigstens zum Teil beseitigt.

Diese Angaben sind zum größten Teil aus theoretischen Erörterungen entstanden. Die einzige praktische Feststellung der Wirkung der OH-Ionen auf den Periapex haben wir in der schnell und radikal eintretenden Linderung bei akuten Periodontitiden nach OH-Ionophorese. Die Arbeit von *Gaza* und *Brandi*⁵³ befaßt sich mit den Wechselbeziehungen zwischen pH und Schmerzempfindung. Diese Autoren behaupten, daß Toxine oder eine Druckerhöhung im Gewebe keine Schmerzen verursachen können, die somatischen Reize der Schmerzempfindung seien Entzündung und Ernährungsstörungen. Die Entzündung ist aber, wie schon *Schade*, *Neukirch* und *Halpert* festgestellt haben, mit einer lokalen Azidose des befallenen Gewebsbezirktes eng verbunden; bei einem Furunkel z. B. wurden Werte bis pH 5,9 gemessen.

Zu ähnlichen Resultaten führten die Versuche von *Frunder*⁵⁴, der pH-Messungen in vivo vornahm. *Frunder* setzte in der Rückenmuskulatur des Meerschweinchens eine Infektion mit *Streptococcus haemolyticus* und maß im Moment der Verletzung einen pH-Wert von 7,2. Nach 16 Stunden wiederholte er die Messung und fand 6,31. Bei einer Infektion mit *Kolibakterium* fand er im Moment der Impfung pH 7,18, nach 44 Stunden pH 6,15, nach 80 Stunden pH 5,40.

Die Entstehung dieser Azidose, die allein die Schmerzhaftigkeit der verschlossenen Herde verursachen sollte, ist, nach *Gaza* und *Brandi*, der mangelnden Pufferung seitens des Blutes zuzuschreiben. Diese entsteht meistens dadurch, daß an der Demarkationszone stark entzündeter Bezirke eine Thrombosierung der kleinen Gefäße den normalen Kreislauf wesentlich einschränkt. Im Wurzelkanal, wo keine Pufferung möglich ist, entwickelt sich diese Azidose in ihrem vollen Umfang. Die Mikroorganismen der infizierten Pulpa haben mehrheitlich eine oxydative, d. h. eine Gärungsfunktion in stark saurem Milieu. *Prader*⁴⁴, dem wir diese Definition verdanken, hat mehrere pH-Messungen bei Eröffnung von Gangränzähnen durch-

geführt! Die gefundenen Werte schwanken zwischen pH 7,2 und 4,5, der mittlere Wert von pH 6 entspricht dem Wachstumsoptimum der Säurebilder.

Aus diesen Betrachtungen ersehen wir, daß im entzündeten periapikalen Gewebe die neutralisierende Wirkung der OH -Ionen zu einer Schmerzlinderung, im zerfallenen Wurzelkanal die alkalisierende Wirkung zur Bakterienabtötung führt. Die schmerzlindernde Wirkung einer alkalisch reagierenden Substanz ist experimentell *in vivo* untersucht worden.

Die schon erwähnten Arbeiten von *Gaza* und *Brandi*⁵³ berichten von langdauernder sofort erreichter Schmerzlosigkeit bei einem furunkulösen Abszeß nach Einspritzung von Phosphatpufferlösung; sie dauerte 12 bis 24 Stunden. Die Autoren warnen aber vor Flüssigkeiten, die einen pH -Wert von mehr als 9,1 besitzen, da sie irreversible Nekrosen hervorrufen. Nach *Eichholtz*⁵⁵ reagieren OH -Ionen mit den Eiweißstoffen des Gewebes, wobei gallenartige, leicht lösliche Alkalialbuminate entstehen, wodurch rasch eine Kolliquationsnekrose entstehen kann. Die Wirkung eines alkalisch reagierenden Stoffes im zerfallenen Gewebe ist aber, nach *Gaza* und *Brandi*, auf wenige Millimeter in der Tiefe beschränkt. Auf diese Angaben gestützt könnte man Schädigungen des periapikalen Gewebes nach einer oder mehreren Applikationen von OH -Ionophorese befürchten, da die pH -Werte, die man bei einer solchen Behandlungsart erreicht, aus der mA/min -Zahl nicht genau ermittelt werden können. Diese Frage beschäftigte unter anderen auch *J. Heiß*⁴⁸, der in einen Kaninchenmuskel nach Einführung der —Elektrode 12 mA/min verabreichte: Die sofort angeschlossene histologische Untersuchung des präparierten Muskels zeigte keine Änderung der Gewebsstruktur. Die gleiche Prozedur wurde wiederholt, die histologische Untersuchung aber erst nach 4 Tagen: Man konnte das Bild einer Entzündung feststellen. Der Autor kann aber nicht mit Sicherheit sagen, ob sie von der OH -Einwirkung oder von der Verletzung herührt. Er resezierte weiter die Wurzelspitze und den umliegenden Knochen eines Zahnes, der 3mal einer Ionophoresebehandlung von 6 mA/min mit einem Abstand von 3 Tagen unterzogen wurde; im histologischen Bild konnte man keine Gewebsänderung feststellen. Er kam daher zum Schluß, daß bei den üblichen Dosierungen keine Schädigungen möglich sind.

Eine ganze Reihe von Autoren berichtet aber von verschiedenen schmerzhaften Reizzuständen, die nach einer Ionophoresebehandlung aufgetreten sind. Bei einer Untersuchungsreihe von 136 Zähnen stellte *Kristen* in 68%, der Fälle eine 1–2 Tage dauernde Reaktion fest, die er auf Hyperämie zurückführen will. In 20% der Fälle 2–3 Tage dauernde Schmerzhaftigkeit; infolge Sekretabflusses aus einer Fistel oder paradental bezeichnet er dies als serösen Reizzustand. In 12% der Fälle mußte man chirurgisch eingreifen. Von einer Überdosierung ist in diesen Fällen kaum die Rede, da er nur 2mal 6 mA/min applizierte. Schon *Lenfant* warnt vor der Gefahr einer Hyperalkalose bei Überdosierung, die speziell in den Fällen vorkommen kann, wo infolge von Gärungs- und Fäulniszuständen (Purin und Pyrimidinbasen) der sauren Gangrän ähnlich klinische Symptome in alkalischem Milieu auftreten können. In diesen Fällen ist nach *Lenfant* eine leicht saure Medikation am Platze. *Bernard* zieht auch die Möglichkeit einer Hyperalkalose in Betracht, speziell bei der sogenannten Silikatgangrän. Er betont, daß eine saure Medikation nur dann wirksam ist, wenn das Foramen apicale breit offen ist. Eine weitere Möglichkeit ist nach *Bernard* die Umpolung, das heißt, eine Ionophorese mit dem $+$ -Pol im Kanal; anstatt einer Nervnadel muß man aber in diesen Fällen eine Platinelektrode apexnahe legen. Eine Dosis von 2 décicoulombs = 3,3 mA min wird dafür empfohlen.

Dieser Begriff der Hyperalkalose als Ursache postionophoretischer Schmerzen wird durch eine Publikation von *Frunder*⁵⁹ in Frage gestellt. Er untersuchte die lokale pH-Änderung des lebenden Gewebes unter Einwirkung chemischer Reizmittel, indem er die Elektrode eines pH-Messers in der Muskulatur des Kaninchenrückens fixierte. Er maß zuerst die pH-Werte bei verschiedenen Graden einer Entzündung und verglich sie mit dem histologischen Bild: bei pH 7,05 Granulationsgewebe und einzelne Entzündungszellen, bei 6,85 serös-zellige Entzündung, pH 6,65 vermehrte leukozytäre Infiltration, von pH 6,50 bis maximal 5,0 zunehmender Gewebszerfall. Er spritzte dann n/10 Essigsäure oder n/10 KOH in das Gewebe unmittelbar unter der Spitze der pH-Messerelektrode: In beiden Fällen konnte er während der Injektion eine starke saure beziehungsweise alkalische Zacke je nach eingeführter Flüssigkeit feststellen. 30–60 Sekunden nach der Injektion, unabhängig von eingespritzten

Stoffen, ein Azidosestoß, der Werte bis pH 6,00 aufwies. Nach 120 Minuten hatte das große Puffervermögen des Blutes normale Gewebsreaktion herbeigeschafft. Als erstes konnte *Frunder* behaupten, daß Reizungen mit entzündungserregenden Substanzen nicht nach der Art der Substanz spezifisch sind: Der Körper reagiert immer mit einem extremen Azidosestoß, der 10 bis 30 Minuten bestehen bleibt. Nach erreichter Aufpufferung durch das Blut setzt dann langsam und stetig zunehmend eine Schädigungsazidose ein. Weiter berichtet *Frunder*, daß starke und fortwirkende chemische Reizungen nach dem initialen Säurestoß eine durch weitere Reizungen nicht mehr beeinflussbare Schädigungsazidose verursachen mit von pH 7,05 an histologisch nachweisbaren entzündlichen Gewebsänderungen. Diese an und für sich sehr exakten Ausführungen und die Tatsache, daß die Schmerzempfindung, wie schon erwähnt, mit einer Azidose verbunden ist, verneinen, daß die einige Zeit nach Ionophoresebehandlung auftretenden schmerzhaften Reaktionen auf Hyperalkalose zurückzuführen sind: Es sei hier dadurch vor einer sauren Medikation gewarnt.

f) Technik der therapeutischen Applikation

Nach der Auffassung von *Bernard*²² und *Wolf*^{23, 24} ist das Legen von Kofferdam für die Ionophoresebehandlung nicht notwendig, da die Applikationszeit so kurz ist, daß mit Watterollen genügend Trocknung erreicht werden kann. Der Zahn wird vom kariösen Dentin befreit, die Pulpakammer eröffnet und ausgeräumt. Eine sich als notwendig erweisende Auswaschung des Kavums kann mit Wasser vorgenommen werden. Jede Krone oder metallische Füllung muß entfernt oder isoliert werden, daß sie mit Kavum und Elektrode nicht in Kontakt kommt. Die Krone wird dann mit Watterollen und Automaton isoliert und mit heißer Luft getrocknet.

Mit einem Nervextraktor wird der Anfangsteil des Kanalinhalt vorsichtig und ohne Druck entfernt. In diesem so frei gewordenen Raum wird die eine Elektrode in Form eines Nervextraktors fixiert. Die Anwendung der gezahnten Nadel als aktive Elektrode verfolgt den Zweck, daß sie an Ort und Stelle bleibt, ohne den Kanal dicht zu verschließen. Dies würde den Nachteil mit sich ziehen, daß die bei der Ionophorese immer stattfindende Gasbildung zu einer Druck-

erhöhung mit Hindurchpressen von infiziertem Material im Periapex führen würde.

Im Falle, daß der Kanal im Anfangsteil nicht sondierbar oder überhaupt nicht auffindbar ist, kann man im Kavum einen Wattenbausch mit 20% NaOH legen und die Elektrode mit diesem in Kontakt bringen.

Die zweite, sogenannte inaktive Elektrode bekommt der Patient in die Hand in Form eines Metallzylinders. Die gezahnte Nadel wird mit dem —-Pol, der Metallzylinder mit dem +-Pol verbunden. Nachher wird der Strom eingeschaltet bis zur beginnenden Schmerzempfindung. Der Milliamperemeter zeigt die Intensität des kreisenden Stromes; sie wird von der Größenordnung von 1,5 bis 3 mA sein.

Die Zeit der Applikation wird von der Intensität abhängig sein. Diese zwei Faktoren ergeben durch Multiplikation die mA·min, das heißt die Quantität der Ionophorese.

Nach *Bernard* und *Wolf* sollen folgende Dosen verwendet werden:

1. In einem einwurzigen Zahn mit zugänglichem Kanal ... 3,3 mA/min.
2. In einem einwurzigen Zahn mit unsondierbarem Kanal ... 6,6 mA/min.
3. Im Falle von ausgedehnter apikaler Läsion ... 10 mA/min.

Bei mehrwurzeligen Zähnen werden die Kanäle separat nach obigem Schema behandelt.

Die ertragenen Stromintensitäten schwanken von Patient zu Patient und am gleichen Patient von Zahn zu Zahn. Ein ausgedehntes Granulom oder sogar eine Zyste erträgt bis zu 5 mA, eine Restpulpa höchstens 1/10 mA.

Während der Behandlung kann die Stromstärke aber auch variieren. Wenn der Strom an Stärke verliert, kann man dieses auf ein Rückströmen des Gases im Periapex zurückführen, verursacht durch Verlegung des Kanaleinganges durch die Elektrode. Normal ist dagegen, wenn der Strom an Stärke langsam zunimmt. Durch die Kataphorese, auf die wir bald zu sprechen kommen, erfolgt eine Befeuchtung des Kanalinhalt und dementsprechend eine Verringerung des Widerstandes gegenüber Ionenwanderung. Eine plötzliche Vermehrung der Stromintensität, meistens mit einer schmerzhaften Reaktion verbunden, deutet auf fehlerhafte Stromableitung.

Dies kann erfolgen durch eine Flüssigkeitsbrücke zwischen Kavum und Zahnfleisch oder zwischen Elektrode und Wange, Lippe oder Zunge. In diesen Fällen muß man die Kavität und die Krone frisch trockenlegen, die Elektrode isolieren oder verlegen.

Die Zahnwurzel wird während der Ionophorese in ein elektrisches Feld einbezogen. Die Strompassage erfolgt durch die geladenen Ionen. Nach *Büchs*³³ spielen sich in einem Elektrolyt bei Strompassage noch folgende zwei Vorgänge ab:

Elektrophorese – die Ionen legen sich an größere Teilchen wie z. B. Blutkörperchen, Stärkekörner, Kolloidteilchen, Bakterien, die dadurch an der Wanderung teilnehmen.

Kataphorese – es ist der Ausdruck der Beteiligung der Lösungsflüssigkeit an der Wanderung. Ionen, die sich an Wassermoleküle anlegen, Metallionen, die sich mit einem Wassermantel umgeben, bewirken ein Mitschleppen von H_2O . Bei der Ionophorese kommt dieser Vorgang deutlich zur Erscheinung; er ist sogar zu begrüßen, da dadurch eine Befeuchtung des Kanales mit Verminderung des Widerstandes geschaffen wird.

Bei der Wurzelfüllung, die unmittelbar nach der Ionophorese gelegt wird, befolgt *Wolf* die Anweisung von *Bernard* nicht, und an Stelle der Paste aus Zitronellol, Zinkoxyd (3 Teile) und wasserfreiem Kalziumsulfat (1 Teil) bis zur rahmigen Konsistenz vermischt, füllt er Silbervioformzement in die Kanäle, nachdem er sie ausgeräumt und erweitert hat. *Bernard* dagegen beläßt den desinfizierten Kanalinhalt als Bestandteil der Wurzelfüllung. Auch bei der Ionophorese haben wir Vorsichtsmaßnahmen und Gegenindikationen. *Bernard* faßt sie wie folgt zusammen:

1. Bei apikaler Läsion, die die benachbarten Zähne erfaßt, muß man alle im Prozeß beteiligten Zähne in der gleichen Sitzung behandeln und füllen.
2. Restnerv (Restpulpitis) verunmöglicht, durch die große Schmerzhaftigkeit der Applikation, eine Ionophoresebehandlung. Empfohlen wird die totale Exstirpation in Lokalanästhesie.
3. Eine Perforation, sei es in der Pulpakammer oder in der Wurzel, muß hermetisch geschlossen werden, sonst ist die Stromableitung in dieser Richtung total. Bei älteren Perforationen, die zu infektiös bedingten Reaktionen geführt haben, wird man vor dem

Verschließen der Perforationsstelle mit Vorteil eine kurze Ionophorese applizieren.

4. Kanäle, die mit Medikamenten behandelt wurden, müssen vor der Ionophorese gereinigt und mit NaOH gewaschen werden, sonst läuft man Gefahr, daß ätzende Ionen durch den Strom in den Periapex transportiert werden. Besonders ungünstig sind Einlagen mit Formaldehydpräparaten und Arsenradikalen.
5. Bei akuten Fällen mit eitriger Sekretion wird nach der Ionophorese das Legen einer alkalischen Einlage bis zum Sistieren der Sekretion empfohlen.
6. Die Fisteln schließen sich meistens nach der Applikation der Ionophorese. Ist dies nicht der Fall, so kann man folgende Methoden anwenden: Entweder legt man in den Fistelgang die positive Elektrode in Form eines Kupferdrahtes oder, bei verschlossenem Wurzelkanal, die negative Elektrode, diesmal in Form einer glatten Sonde anstatt einer gezahnten Nadel.
7. Im Falle eines im Kanal abgebrochenen Instrumentes kann man die OH-Ionophorese ohne besondere Maßnahmen durchführen, wenn das Instrument den Kanal nicht dicht verschließt. Wenn der Kanal dicht verschlossen ist, besteht die Gefahr, daß infolge Gasbildung im abgeschlossenen Kanalteil infiziertes Material in den Periapex gestoßen wird.

Einige Jahre später veröffentlichten *Bernard*⁵⁶ und sein Schüler *Lenfant*⁴⁵ eine neue Technik und besondere Vorsichtsmaßnahmen. *Bernard* kommt zur Einsicht, daß durch die Ionophorese nur Haupt- und Seitenkanäle sterilisiert werden können; die Heilung des Granuloms wird dem Körper überlassen. Damit noch mehr OH-Ionen ihre pharmakologische Wirkung entfalten können, füllt er den geräumten Kanal mit Calxyl und führt die Ionophoresebehandlung aus, nachdem er die Calxylmasse negativ gepolt hat. Dieses Calxyl-depot nennt er plastische Elektrode.

Nach der Applikation füllt er nochmals Calxyl als definitive Wurzelfüllung in den Kanal ein. Da aber Calxyl rasch vom Knochengewebe resorbiert wird, muß man die Wurzelfüllung mit Abstand von 5 bis 6 Tagen bis zur erreichten Sättigung wiederholen. Dazu braucht man meistens 3 Nachfüllungen.

Mit der Zeit hat sich gezeigt, daß der gangränöse Kanalinhalt, infolge Bildung von Purin- und Pyrimidinbasen, auch eine alkalische Reaktion aufweisen kann. Nach *Lenfant*⁴⁵ sollte dies bei der Silikatgangrän häufig der Fall sein. In diesem speziellen Fall ist die basische Behandlung mit der Ionophorese nicht indiziert. *Bernard*⁵⁶ empfiehlt dafür entweder eine leicht saure Einlage oder die positive Polung des Kanalinhaltes mit einer Platinelektrode. Diese letzte Methode kann man auch bei medikamentös behandelten oder devitalisierten Wurzelkanälen anwenden; die reizenden Ionen werden so Richtung Pulpakammer dirigiert! Für diese speziellen Fälle sind 3,3 mA/min genügend.

Weiter erklärt sich *Bernard*⁵⁶ damit einverstanden, daß die Seitenkanäle und apikalen Ramifikationen, trotz Desinfektion durch Ionophorese, wenn sie nicht von der Wurzelfüllung erfaßt werden, sich reinfizieren können. Als Sicherung der mit der OH-Ionophorese erreichten Desinfektion legt er die Calxylwurzelfüllung.

Nach der Ionophorese appliziert *Bernard* die von ihm diadynamisch genannten Ströme. Diese durch niedere Frequenz charakterisierten Ströme sollten einen doppelten Zweck verfolgen: Reizung der Zellen zu reparativer Leistung und Linderung der Schmerzen bei Reizzuständen.

Neuerdings beschäftigt sich *Bernard* mit der Frage der Wurzelfüllung; von der Annahme ausgehend, daß die Ionophorese bei der Behandlung von Granulomen eine absolut sichere Methode ist, schreibt er die Mißerfolge den technischen Fehlern von Apparat und Zahnarzt zu. Als heilungshemmenderen Faktor betrachtet er unter anderem die Wurzelfüllung mit körperfremden Mitteln und das Ausbleiben der Füllung bei den Seitenkanälen und apikalen Ramifikationen. Um diese Nachteile zu eliminieren, propagiert er nun eine expansive Wurzelfüllung!

*Knappwost*³⁰ nimmt in diesem Fragenkomplex eine Sonderstellung ein, auf die ich näher eingehen muß. Von der Tatsache ausgehend, daß die erreichten pH-Werte nicht allein maßgebend sind und daß die Zeit der Einwirkung eine ebenso große Rolle spielt, erklärt er die Bernardsche Ionophorese als ungenügend. Es ist z. B. experimentell bestimmt worden, daß es bei pH 12,5 volle 4 Stunden gebraucht hat, um eine *Bac. subtilis*-Kultur total zu vernichten. Er betonte dann richtigerweise, daß im Kanal ein pH 12 bis 13 als

desinfektorische Kraft wünschenswert ist, im Periapex aber zu schädlichen Ätzungen führen kann. Er empfiehlt dafür 2 Modifikationen:

1. Nach Ausräumung des Wurzelkanals und der Wurzelfüllung mit Reorganbrei als OH-Ionendepot Durchführung einer langdauernden Ionophorese mit minimaler Stromintensität oder
2. nachdem er wie oben den Kanal mit Reorgan gefüllt hat, fixiert er sein Stiftelement im Zahn. Das Stiftelement besteht aus 2 zusammengelöteten Metalldrähten; der eine depolarisierte Teil kommt in den Reorganbrei zu liegen und stellt den —Pol dar, der andere wird mit dem Zahnfleisch in Kontakt gebracht. Da beide Metalle so gewählt sind, daß sie eine elektrische Spannung erzeugen, fließt dank dieser Vorrichtung ein kontinuierlicher schwacher OH-Ionenstrom durch den Apex in das periapikale Gewebe.

Experimentell in Phantomversuchen bestimmte *Knappwost*, daß bei einem Initial- pH -Wert von mehr als 11 noch nach 21 Tagen ein pH von 9 bis 10 registriert werden konnte. Er empfiehlt die Anwendung seines galvanischen Stiftelementes allein oder als Unterstützung und Sicherung einer vorausgegangenen Bernardschen Ionophorese.

Als Wurzelfüllung entwickelte *Knappwost*, mit Hilfe von Mitarbeitern, ein alkalisch reagierendes Aluminiumsilikatzement, Alkalperm genannt, das gewebtsfreundlich ist und mit Volumenzunahme abbindet. Dadurch erreicht er es, eine Wurzelfüllung zu legen, die die Alkalisierung nicht puffert wie die gewöhnlichen, längere Zeit sauer reagierenden Oxyphosphatzemente, die, wenn sie durch den Apex gepreßt wird, keine periodontale Reizung hervorruft und die, infolge Expansion, den Wurzelkanal dicht abschließt.

g) Stromarten und Apparaturen

Die optimale Wirkung im Sinne eines besseren Transportes würde man mit einem Gleichstrom wie z. B. einem Batteriestrom erreichen. Experimentell wurde aber festgestellt, daß eine solche Stromart für den Patienten am unangenehmsten ist; sie verursacht schon bei einer kleinen mA-Zahl eine wesentliche Schmerzempfindung. Die beste Verträglichkeit ist mit einem sogenannten pulsierenden oder ondulierenden Gleichstrom beobachtet worden. Die unter den An-

weisungen von *Bernard* konstruierte Apparatur liefert einen sinusoiden Wellenstrom (courant ondulatoire sinusoidal). Nach seinen Angaben weist eine solche Stromart die geringstmögliche Schmerzhaftigkeit auf und erhöht als Sekundärererscheinung den respiratorischen Stoffwechsel der Gewebe. Nach Einführung der OH-Ionophorese wurden eine ganze Anzahl Apparate in den Handel gebracht. Obwohl die Wirkung der OH-Ionen nicht vom Apparat, der sie zum Entstehen bringt, abhängig ist, muß man von einem Ionophoresegerät gewisse Anforderungen verlangen. Zuerst und vor allem muß ein Apparat genügend gesichert sein, da bei einem Versagen des Transformators der Patient einer Spannung von 220 Volt ausgesetzt ist. Weiter verlangt man im Patientenstromkreis eine maximale Spannung von 60 Volt, da höhere Spannungen bei schwächlichen Patienten schon gefährlich sein können. Das Vorhandensein eines empfindlichen Amperemeters ist nach unserer Auffassung eine weitere Bedingung für die Durchführung einer exakten Ionophorese. Aus dem Ausschlag des Milliampereometers kann man nämlich allerlei Schlüsse über Verlauf und Möglichkeiten der Behandlung ziehen.

4. Eigene Untersuchungen

A. Vorversuche

Vorerst wurden einige Phantomversuche ausgeführt:

I. An frisch extrahierten Zähnen wurden zuerst die Grundversuche von *Bernard*²² zur Kontrolle wiederholt. Die Zähne wurden in einer Gelatinemasse eingebettet, der Phenolphthalein beigelegt wurde. Die Rotfärbung, die bei pH 9 auftritt, zeigte sich nach Strompassage in einer Zeitspanne von 2 bis 5 Minuten bei Anwendung einer Stromintensität von etwa 2 mA. Es wurde von jedem Zusatz von NaOH und einer Kanalerweiterung Abstand genommen; die OH-Ionen bildeten sich aus dem gangränösen Kanalinhalt nach dem schon erwähnten Vorgang. In diesem Anfangsversuch zeigte sich eine Tatsache, die nicht unbedeutend ist. Die Zähne wurden von einer Wachsmanschette gehalten, die am apikalwärts gelegenen Drittel der anatomischen Zahnkrone fixiert war. Die Gelatine war mit der Wachsplatte in Kontakt. Es wurden folgende Beobachtungen gemacht: An der Schmelzzementgrenze gab es kurze Zeit nach Ein-

schaltung des Stromes eine intensive Rotfärbung, der nach einem Intervall von 1 bis 2 Minuten die Färbung am Apex und an den Seitenkanälen folgte. Diese Erscheinung zeigte sich jedesmal, wenn die Schmelzzementgrenze mit der Gelatine in Kontakt war, sie blieb aber aus, wenn die in Diskussion stehende Zone von der Wachsplatte abgedeckt wurde. Die beschriebene Strompassage interpretierten wir, wie schon *Prader*⁹ im Jahre 1939, als einen Beweis der Dentinquerleitung und der relativen Stromundurchlässigkeit des Zementmantels der Wurzel. Die gleiche Erscheinung wurde auch von *Büchs*³³ und *Scheufele*³⁵ beobachtet.

II. Bei einigen Zähnen wurde am Apex der Wurzelkanal mit einem umgekehrten Kegelbohrer erweitert und mit Amalgam wanddicht gefüllt. Trotz Anwendung der vom Apparat maximal erlaubten Stromstärken zeigte der Milliamperemeter keine Strompassage, wenn die Wachsplatte die Schmelzzementgrenze dicht verschloß. Daraus ergibt sich, daß bei verschlossenem Wurzelkanal die OH-Ionen in toto via Zahnhals durch das paradentale Gewebe hindurchwandern, was die ganze ionophoretische Behandlung illusorisch macht! Das ist ein Unsicherheitsfaktor, der nicht außer acht gelassen werden darf.

III. Von verschiedener Seite wurde behauptet, daß bei der früher angewendeten Jodjodkaliionophorese infolge Bildung von KOH ebenfalls OH-Ionen wandern, so daß die Erfolgsquote dank dieser doppelten Wirkung viel größer hätte ausfallen sollen. Zur Abklärung dieser Frage wurde aus einem extrahierten Zahn der nekrotische Kanalinhalt entfernt; in den Kanal legten wir eine Jodjodkali-Einlage, der Zahn wurde in Gelatine eingebettet, dem wie gewohnt Phenolphthalein beigemischt wurde. Es wurde folgendes festgestellt: Nach Einschaltung des Stromes verfärbte sich die braune Einlage in der Zeit von etwa 8 bis 10 Minuten, ohne daß an den Stromaustrittsstellen irgendeine Rotfärbung auftrat. Erst nach vollständiger Bleichung der Einlage trat nach kurzer Zeit die bekannte Rotfärbung am Apex in Erscheinung. Wurde dann eine neue mit Jodjodkali getränkte Watteeinlage gelegt und der Zahn in einen frischen Gelatineblock eingebettet, so dauerte es nochmals 8 bis 10 Minuten, bis die Rotfärbung wieder in Erscheinung trat. Da bekanntlich bei der Jodkaliionophorese die Einlage sofort nach der Verfärbung gewechselt wurde, ist mit großer Wahrscheinlichkeit mit weniger OH-

Ionen zu rechnen, als daß sie irgendeine Wirkung hätten entfalten können.

IV. An einigen Zähnen, die schon eine Wurzelfüllung hatten, versuchte man eine Strompassage ohne Entfernung der Füllung zu erzwingen. Sie blieb aber vollständig aus, auch wenn man einen Wattebausch mit 20% NaOH in das geräumte Kavum legte.

B. Klinische Untersuchungen

a) Untersuchungsmaterial und Behandlungsmethodik

Ich benütze für alle meine Phantom- und Patientenversuche den Ionophorator der Pharmachemie AG, Zürich, eine Apparatur mit Netzanschluß, die sich schon in früheren Arbeiten auf dem Gebiete der Ionophorese bewährt hatte. Dieses Gerät wurde vom Schweizerischen Elektrotechnischen Verein geprüft und zur Verwendung zugelassen. Es besteht aus Transformer, Gleichrichter und einer empirischen Anordnung von Kondensatoren, die einen Wellenstrom liefern, der dem menschlichen Körper die kleinstmöglichen Schmerzen bereitet. Ferner benützte ich die gingivale Gabelelektrode, die aus rein technischen Gründen der zylindrischen Handelektrode überlegen ist. Diese Elektrodenanordnung wurde mit der Absicht getroffen, ein Maximum von Zahn und Periodont mit dem elektrischen Strom und damit mit dem Medikament zu erreichen. Mit einem kleineren Abstand der Elektroden nimmt nämlich die Stromdichte zu, das heißt die Zahl der Stromlinien pro Flächeneinheit. Das entsprechende Gesetz lautet: Mit Abnahme der Elektrodenentfernung nimmt die Stromlinienstreuung ab, das heißt die Stromlinienzahl auf einem Gebiet nimmt zu. Durch Wurzel-, Dentin- und Markkanäle fließt der Strom nach dem Kirchhofschen Verteilungsgesetz. Dabei verhalten sich die Stromstärken in den verschiedenen Kanälen umgekehrt proportional zu den vorhandenen Widerständen. Um auch die engeren Kanäle mit dem Strom zu erreichen, ist ein Maximum an Stromstärke erwünscht. Die Formel sagt, daß die Kraft des Stromes mit der Zunahme des Elektrodenabstandes quadratisch abnimmt. Die Kraft des Stromes ist auch bestimmend für die Feldstärke: Bei zunehmender Kraft wächst die Feldstärke. Aus der Stockesschen Reibungsformel ist die Ionengeschwindigkeit zu berechnen. Dabei ergibt sich, daß bei wachsender Feldstärke die

Ionengeschwindigkeit zunimmt. Wir ersehen daraus, daß bei geringem Elektrodenstand sowohl ein Maximum an Raum mit dem Medikament erreicht wird als auch die Ionengeschwindigkeit zunimmt.

Weiter ist der Spannungsabfall, der logischerweise auf die für den relativ schwachen Strom große Distanz eintritt, eliminiert, abgesehen davon, daß die menschliche Haut als größter Widerstand ausgeschaltet wird.

Vor der eigentlichen kritischen Besprechung der klinischen Ergebnisse sei die Methode der Behandlung dargelegt. Von den poliklinischen Patienten wurden diejenigen Fälle ausgesucht, bei denen ein unbehandelter Gangränzahn mit Granulom vorhanden war. Um die ganze Untersuchung zu vereinfachen, und um Zeit zu sparen, wurden meistens einwurzelige Zähne ausgesucht. Im ganzen wurden 59 Zahneinheiten in Behandlung genommen, die in zwei Gruppen geteilt werden können: Diejenigen, die keine klinischen Veränderungen verursachten, also nur eine rein röntgenologisch feststellbare periapikale Läsion, und diejenigen, die Schmerzen verursachten, eine sezernierende Fistel aufwiesen oder die Ursache einer Parulis waren.

Allgemein wurde der in Behandlung genommene Zahn unter Kofferdam gelegt, abgejodet, mit Rosenbohrer die Pulpakammer eröffnet und von den Resten von Karies peinlich gereinigt. Mit einem sterilen Nervextraktor wurde dann der Anfangsteil des Wurzelkanals vom gangränösen Inhalt befreit. In diesem freigewordenen Teil des Wurzelkanals wurde die negative Elektrode in Form einer sterilen Nervnadel fixiert. Die positive Elektrode in Form der schon erwähnten gingivalen Gabel wurde ebenfalls an der Umschlagfalte angelegt, die Apparatur unter Strom gesetzt und der Potentiometerknopf bis zur beginnenden Schmerzempfindung aufgedreht. Mit unserer Apparatur schwankten die erreichten Milliamperewerte zwischen 2 und 3, je nach Ausdehnung des Herdes und Empfindlichkeit des Patienten. Die Frage der Dosierung konnte ich am Anfang meiner Erfahrungen nicht einheitlich lösen. Bei den ersten Fällen war ich sehr vorsichtig, applizierte aber im folgenden ziemlich hohe Dosen, da die in der Literatur beschriebenen Schmerzen nie beobachtet werden konnten. Bei einigen wenigen Fällen versuchte ich eine massive Abgabe von OH-Ionen zu erreichen, indem ich unter Leitungsanästhesie Ionophoresebehandlungen mit Stromintensitäten von 5 mA ausführte. Allgemein hielt ich mich aber an

folgende Regel: Mit dem putriden Kanalinhalt als Elektrolyt verabreichte ich 10–12 mA/min. Weiter wurde der Kanalinhalt entfernt und mit Kernadeln und Hedströmfeilen der Wurzelkanal erweitert und mechanisch gereinigt. Ich legte dann eine sterile, mit verdünntem NaOH getränkte Wattenadel in den Kanal, die negative Elektrode wurde mit der Wattenadel in Kontakt gebracht und nochmals eine Ionophorese mit Dosen von 10 bis 20 mA/min je nach Ausdehnung des Herdes ausgeführt. Den Abschluß der in einer einzigen Sitzung ausgeführten Behandlung bildete die Austrocknung des Kanals und eine anschließende Wurzelfüllung mit Phosphatzement und Guttaspitze. Für weitere Einzelheiten verweise ich auf die folgenden Tabellen, wo Fall für Fall einzeln beschrieben wird.

Kurz zur Frage der Wurzelfüllung: Wir gingen von der Voraussetzung aus, die OH-Ionophorese ohne Einwirkung fremder Medikamente zu untersuchen. Eine ionenmäßig indifferente Füllung zu finden, war kein einfaches Problem. Mit Paraffin z. B. konnte man infolge technischer Schwierigkeiten keine annehmbare wanddichte Füllung erreichen, so daß wir zum Phosphatzement kamen, obwohl es uns ganz klar ist, daß diese Masse eine der Ionophorese entgegengesetzte Wirkung entfaltet. *Knapppost* (Vortrag Zürich, April 1952) berichtete z. B., daß Phosphatzement noch nach 4 Tagen einen pH-Wert von 6,31 aufweist, das heißt sauer reagiert, währenddem wir mit der Ionophorese eine Alkalisierung erreichen möchten. Weiter muß ja die Schwierigkeit einer bis zum Apex reichenden körperfremden Wurzelfüllung als Fremdkörperreiz jedem bekannt sein!

b) *Klinische Resultate und Röntgenbefund*

Die rein klinischen Resultate sind fast in allen Fällen günstig ausgefallen.

1. *Klinisch reaktionsfreie Zähne.* Bei den Zähnen, die vor der Behandlung keine Störungen verursacht hatten, beobachteten einige Patienten, bei denen relativ hohe Stromdosen angewendet wurden, etwa 2 bis 3 Stunden nach der Behandlung ein leichtes kaum wahrnehmbares Ziehen in der von Ionenstrom erfaßten Kiefergegend. Diese in einer Zeitspanne von 6 bis 8 Stunden verschwindende subjektive Empfindung schreiben die meisten Autoren der Hyperalkalose zu. Nach den schon erwähnten Berichten von *Frunder*⁵⁴ aber neige ich mehr dazu, dies als den klinischen Ausdruck

einer Schädigungsazidose aufzufassen. Bei 7 Patienten aber war die Reaktion heftiger. Bei einer ersten Gruppe von 3 Zähnen traten nach der Ionophorese derartige Schmerzen auf, daß eine Lüftung und eine medikamentöse Einlage notwendig wurden. Bezeichnend für diese erste Gruppe ist aber die Tatsache, daß es sich um einige der ersten Behandlungen mit niedrigen Stromdosen handelte, und zwar 10 bis 13 mA min. Durch ungenügende Sterilisation des Kanalinhaltes ist sehr wahrscheinlich noch bakterienhaltiges Material transapikal geschoben worden, so daß es zum akuten Schub gekommen ist. Diese 3 Zähne konnten aber nach einer klassischen Gangränbehandlung nach *Walkhoff* völlig funktionstüchtig erhalten werden. Bei zwei weiteren Fällen war der Kanal mit den feinsten Nadeln nicht sondierbar. Ich versuchte trotzdem eine ionophoretische Behandlung auszuführen, und zwar mit der von *Bernard*²² angegebenen Methode des Wattebausches mit 20% NaOH im Kavum. Der Milliampereometer zeigte eine schwache Strompassage an. In einer Zeitspanne von 6 bis 12 Stunden traten aber periodontitische Schmerzen mit starker Klopfempfindlichkeit auf; die interdentale Papille und der Zahnfleischsaum waren geschwollen und gerötet. Nach meiner Auffassung sind diese Fälle, bei denen der OH-Strom gleich wie bei den Phantomzähnen ausschließlich am Zahnhals ausgetreten war. Diese Reaktion verschwand in etwa 2 Tagen von selbst. Die zwei letzten Mißerfolge sind sehr wahrscheinlich einer Überdosierung zuzuschreiben: Die applizierten Stromdosen waren 38 bzw. 34 mA min. Es traten parulisartige Erscheinungen auf: Nach der Inzision war keine typische Eiterbildung anzutreffen. In die Inzisionswunde praktizierte ich eine Saugspülung mit physiologischer NaCl-Lösung, wobei die klinischen Beschwerden nach 1 bis 2 Tagen zurückgingen. Ähnliche Erscheinungen sind von *Bernard* und *Lenfant*^{45, 46} beschrieben worden.

II. *Zähne mit akutem periapikalem Prozeß.* Patienten kamen mit klinischen Beschwerden, die von der Klopfempfindlichkeit bis zur Parulis mit schon vorhandener Einschmelzung reichten. In 5 Fällen war der Abszeß bereits subperiostal oder sogar submukös. Die sofortige Applikation hoher Stromdosen (30 mA/min) und anschließende Inzision brachte schon in den ersten Stunden nach der Behandlung eine wesentliche, vom Patienten sehr begrüßte Linderung, die bis zum nächsten Tag in einen Zustand der Schmerzfreiheit

übergang. In diesen Fällen füllte ich den Kanal nicht sofort, sondern legte als unterstützende Vorsichtsmaßnahme eine Einlage mit Calxylmilch in den Wurzelkanal. In der zweiten Sitzung, das heißt nach 2 Tagen, benutzte ich diese Calxylösung als Elektrolyt für eine zweite Ionophorese. Die restlichen 7 Fälle dieser Gruppe wiesen eine Klopfempfindlichkeit auf; dies sind die dankbarsten und einfachsten Fälle für eine Ionophoresebehandlung. Die Stromdosis bestimmte ich individuell, indem ich von Zeit zu Zeit den Zahn abklopfte: Bei erreichter Schmerzfreiheit hörte ich mit der Behandlung auf. Die sofortige feste Wurzelfüllung wurde auch in diesen Fällen ausgeführt. Nach einer Latenzzeit von etwa $1\frac{1}{2}$ bis 2 Stunden traten dann in 4 Fällen trotzdem noch leichte ziehende Schmerzen auf, die im Laufe des Tages aber restlos verschwanden. Man wäre dazu geneigt, diesen sofort eintretenden Erfolg mit den von *Gaza* und *Brandt* gemachten Beobachtungen in Zusammenhang zu bringen. Es ist aber unwahrscheinlich, daß in einem gut durchbluteten Körperbezirk eine auch nur 1 Stunde dauernde Alkalisierung zu erreichen ist. *Bernard*⁵⁶ selbst behauptet, daß die sofortige Schmerzlinderung eine reine Stromwirkung sei. Einige andere Autoren behaupten, daß die gleichen Resultate mit einer kutanen bipolaren Kurzwellenapplikation zu erreichen wären. Nach anderen Autoren ist die Schmerzlinderung auf Druckentlastung im Periapex infolge Kataphorese zurückzuführen.

III. *Fisteltragende Gangränzähne*. Bei denjenigen Fällen, die eine Fistel hatten, konnte ich eine restlose Ausheilung schon 1 bis 2 Tage nach einer einzigen Ionophoresebehandlung beobachten, so daß die an und für sich komplizierte Methode, die positive Elektrode in den Fistelgang zu legen, oder sogar die von *Hufnagel*²⁵ empfohlene negative Polung des Fistelganges und positive Polung des mit Calxyl gefüllten Kanals sich als unnötig erwiesen.

IV. *Die röntgenologischen Resultate*. Für die tägliche Praxis ist der röntgenologische Befund der behandelten, granulomtragenden Zähne die geläufigste Kontrolle, da die sichere, bakteriologische Untersuchung, auch in Form des Mikrotestes, mit zu vielen Apparaturen und Zeitaufwand verbunden ist. *Büchs*⁵⁸ stellte weiter fest, daß das Mikrotestverfahren die anaeroben Bakterien nicht zum Wachstum bringen kann, was leicht zu Fehlschlüssen führen kann. *Bernard*⁵⁶ nimmt bewußt von einer bakteriologischen Untersuchung



Fig. 1

Ionophorator der Pharmachemie AG, Drusbergstraße 125, Zürich 7/53



Fig. 2

Schematische Darstellung der
Zangenelektrode

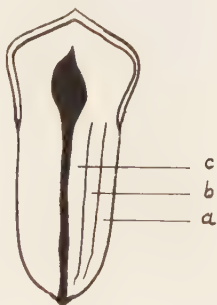
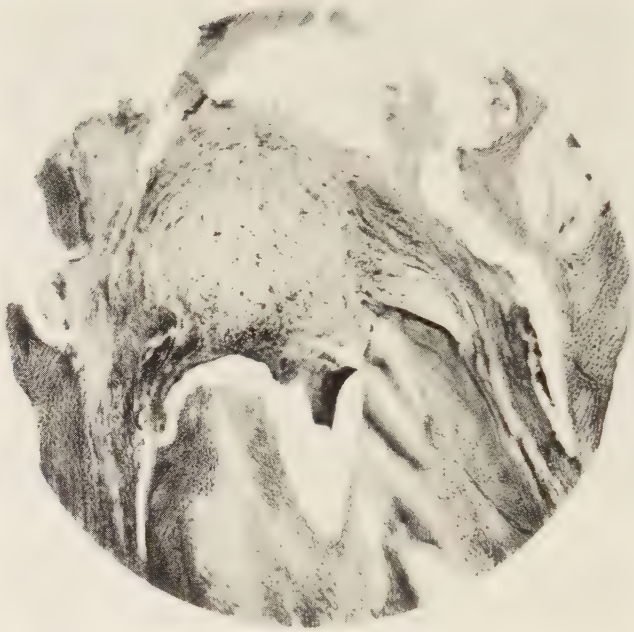


Fig. 3



Aufnahme vor der
Behandlung



Aufnahme 9 Monate später,
vor der Resektion

Präparat Nr. 1

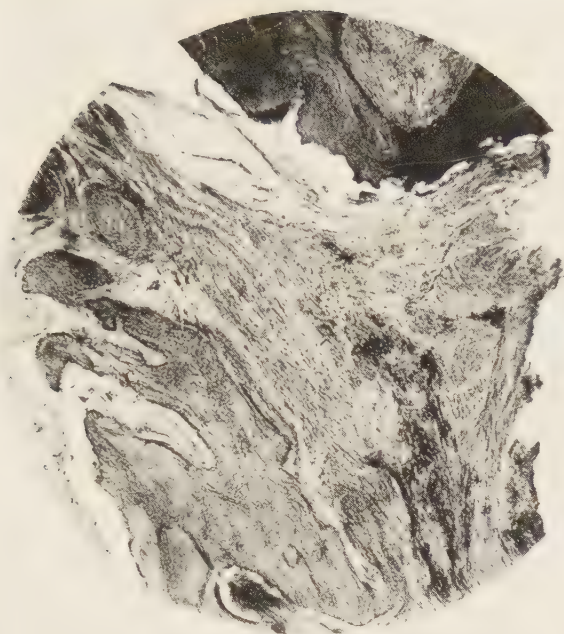
Zahngattung: 2 +

Zeit der Beobachtung: 9 Monate

Stromdosis: 10 + 8 mA/min

Wurzelfüllung: Zement + Guttaspitze

Die Wurzel, durch das Foramen getroffen, zeigte starke Resorptionen der Wurzelspitze. Über der Wurzelspitze ein Granulationsherd, dessen Gewebe in den Wurzelkanal hineinwuchert. Das Granulom ist durch eine dichte Bindegewebskapsel nach peripher abgeschlossen. Keine Knochenneubildung. Keine Zementreparation.



Aufnahme vor der
Behandlung



Aufnahme 9 Monate später,
vor der Resektion

Präparat Nr. 2

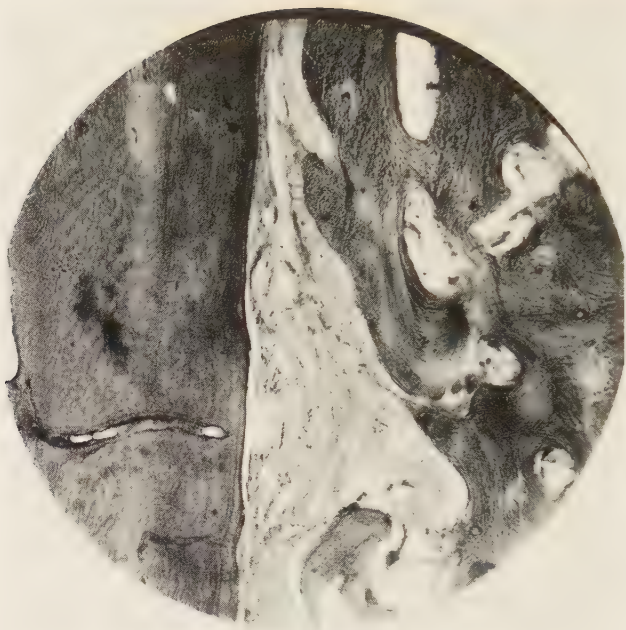
Zahngattung: 1 +

Beobachtungszeit: 9 Monate

Stromdosis: 10 + 8 mA/min

Wurzelfüllung: Zement + Guttaspitze

Wurzelspitze stark resorbiert. Im Wurzelkanal eingewachsenes Bindegewebe mit entzündlichen Erscheinungen. Über der Wurzelspitze ein stark bindegewebig vernarbtes Granulationsgewebe mit Infiltration, Knochenmark fibrös, keine Knochenneubildung.



Aufnahme vor der
Behandlung



Aufnahme 12 Monate später,
vor der Resektion

Präparat Nr. 4

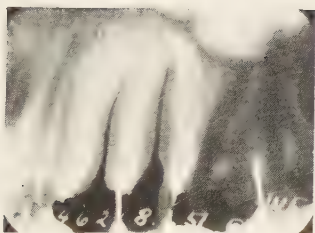
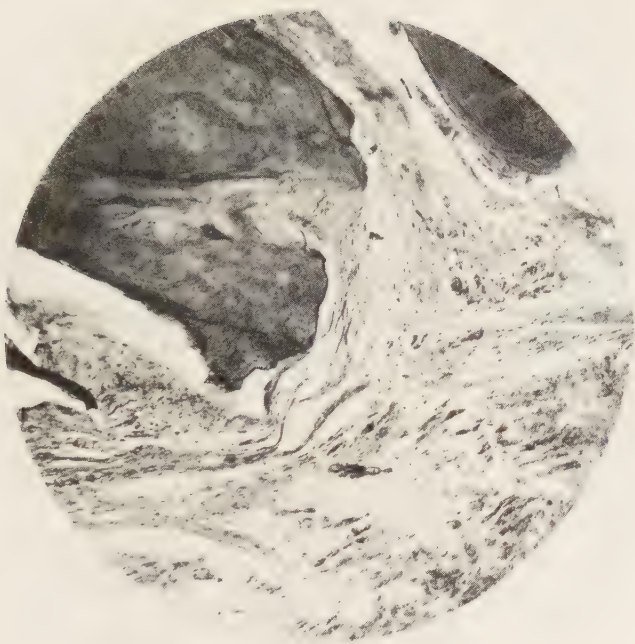
Zahngattung: +3

Beobachtungszeit: 12 Monate

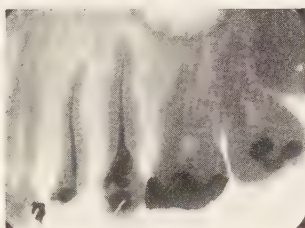
Stromdosis: 10 + 6 mA/min

Wurzelfüllung: Zement + Guttaspitze

Ein vom Hauptkanal abzweigender Markkanal hat zu einem seitlichen Granulom geführt, das eine leichte bindegewebige Abgrenzung gegen die Peripherie zeigt. Gefäße stark erweitert; trotz Ionophorese keine Rückbildung des Granuloms.



Aufnahme vor der
Behandlung



Aufnahme 11 Monate später,
vor der Resektion

Präparat Nr. 5

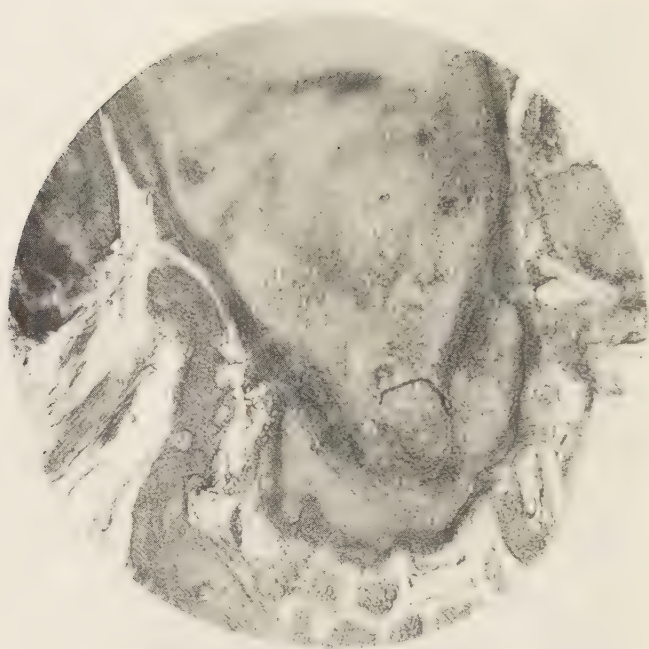
Zahngattung: +4

Beobachtungszeit: 11 Monate

Stromdosis: 12 + 10 mA/min

Wurzelfüllung: Zement + Guttaspitze

Über der Wurzelspitze ein Granulationsgewebe, das reichlich mit Rundzellen durchsetzt ist. Das Granulationsgewebe in den Wurzelkanal hineinwuchernd und zum Teil die Wandung resorbierend. Wurzelspitze an der Oberfläche resorbiert, Knochen nicht mehr im Präparat sichtbar.



Gleiche Röntgenaufnahmen wie Präparat Nr. 5

Präparat Nr. 6

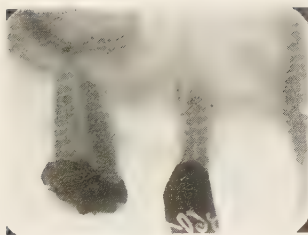
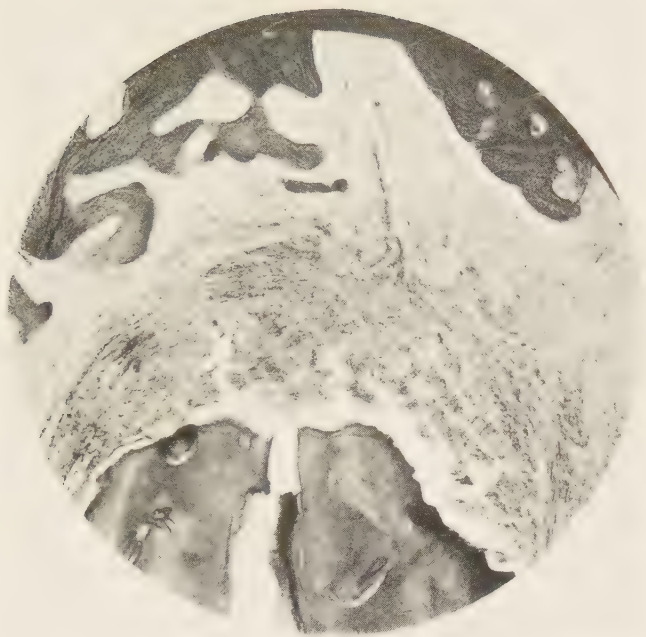
Zahngattung: +5

Beobachtungszeit: 11 Monate

Stromdosis: 12 + 10 mA/min

Wurzelfüllung: Zement + Guttaspitze

Die Wurzelspitze zeigt eine Hyperzementose. Das Periodont zeigt unregelmäßig geformte Bindegewebszüge, keine Entzündung im Periodont, keine Knochenneubildung. Im Bindegewebe eigenartige Vakuolenbildung; die Färbung der Zellen ist etwas vermindert.



Aufnahme vor der
Behandlung



Aufnahme 7 Monate später,
vor der Resektion

Präparat Nr. 8

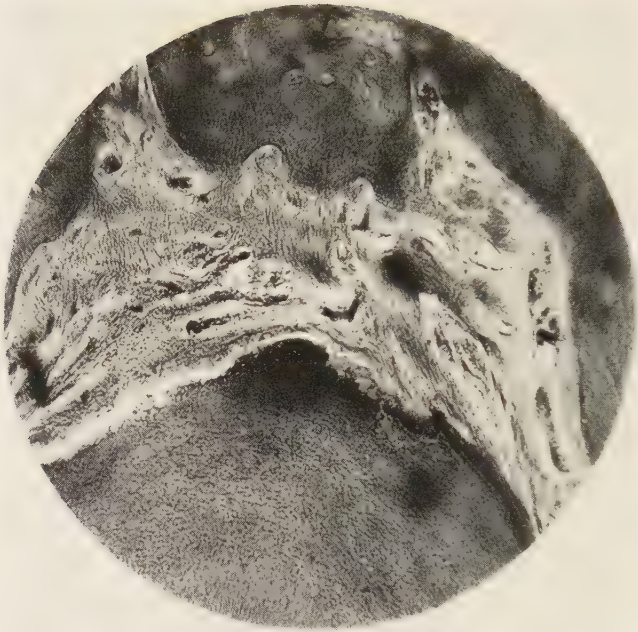
Zahngattung: 5 +

Beobachtungszeit: 7 Monate

Stromdosis: 10 + 16 mA/min

Wurzelfüllung: Zement + Guttaspitze

Die Wurzelspitze zeigt apikale Verästelungen und starke Resorptionen von Zement und Dentin. Über der Wurzelspitze entzündliches Granulationsgewebe, das durch eine bindegewebige Kapsel nach peripher abgegrenzt ist. Knochenmark überall zellig infiltriert, keine Knochenneubildung.



Aufnahme vor der
Behandlung



Aufnahme 12 Monate später,
vor der Resektion

Präparat Nr. 9

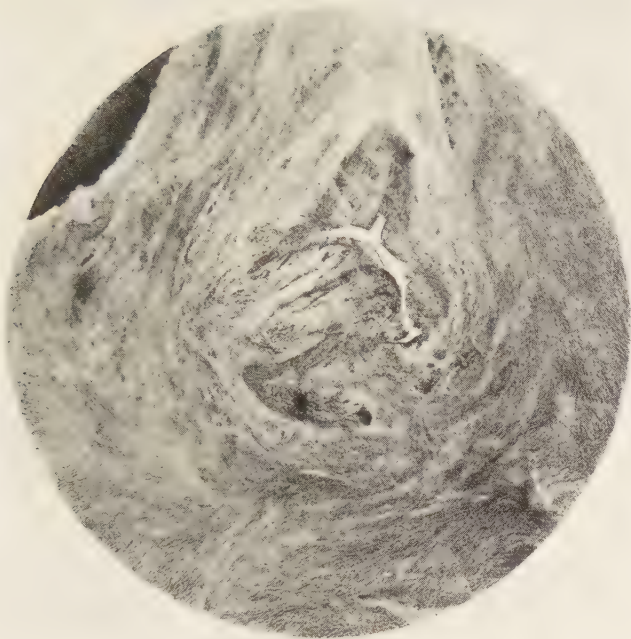
Zahngattung: 4 —

Beobachtungszeit: 12 Monate

Stromdosis: 12 + 16 mA/min

Wurzelfüllung: Zement + Guttaspitze

Die Wurzelspitze zeigt Resorption des Zementmantels. Das Periodont hat nur vereinzelte Infiltrationsherde. Das ganze Periodont durch Bindegewebszüge durchwachsen, zum Teil funktionell orientiert. Gefäße erweitert, Knochenmark fibrös mit Infiltration.



Aufnahme vor der
Behandlung



Aufnahme 6 Monate später,
vor der Resektion

Präparat Nr. 12

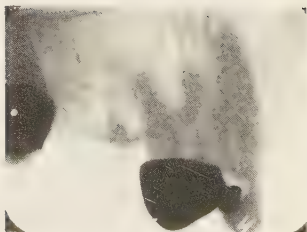
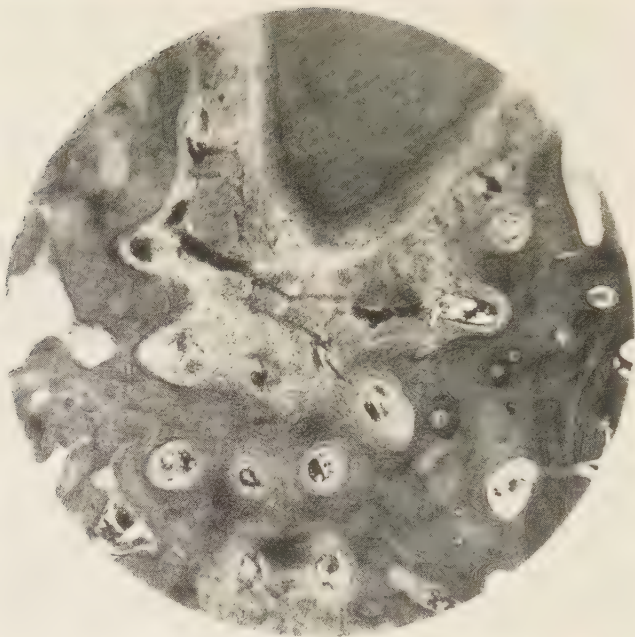
Zahngattung: —1

Beobachtungszeit: 6 Monate

Stromdosis: 20 + 20 mA/min

Wurzelfüllung: Zement + Guttaspitze

Über der Wurzelspitze, die eine Resorption der Oberfläche aufweist, ein Granulationsgewebe, das durch eine außerordentlich starke Bindegewebskapsel nach außen abgegrenzt ist. Zwischen den einzelnen Bindegewebsbündeln deutliche Infiltrationsherde. Im zentralen Teil eine Epitheleinwucherung, die Durchwachsung und Auflockerung des Gefüges durch Leukozyten zeigt. Im zentralen Teil der Epithelwucherung beginnende zystische Hohlraumbildung.



Aufnahme vor der
Behandlung



Aufnahme 7 Monate später,
vor der Resektion

Präparat Nr. 13

Zahngattung: +3

Beobachtungszeit: 7 Monate

Behandlung, um einen Vergleich beider Methoden
am gleichen Patienten zu ermöglichen, mit Walk-
hoffscher Jodoformpaste

Periodont zeigt starke Gefäßerweiterung, im Gewebe sind aber keine entzündlichen Infiltrate. Das Bindegewebe zeigt eine gute funktionelle Orientierung. Die Wurzelspitze ist nicht resorbiert. Das umgebende Knochengewebe zeigt leichte osteoide Säume. Im Knochenmark keine Infiltrate. Der etwas von der Wurzelspitze entfernt liegende Gewebsbezirk zeigt bindegewebige Vernarbung.

Abstand, da nach seiner Meinung nur eine röntgenologische Kontrolle die periapikalen Zustände aufzuklären vermag. Engel⁵⁸ bewies weiter, daß Röntgenaufnahme und pathohistologischer Befund in den großen Linien übereinstimmen. Man kann aber nicht verschweigen, daß eine Röntgenaufnahme je nach Belichtungszeit und Winkelstellung des Tubus ein Granulom größer oder kleiner abbilden läßt, so daß eine gewisse Fehlerquelle vorhanden ist.

Eine Granulomheilung, die mehr als 6 Monate braucht, ist nach Bernard eine gestörte Heilung. Diese Faustregel in der Beurteilung in der Erfolgsquote ist in Deutschland von vielen Autoren angenommen worden. Nach unserer Auffassung aber gilt dies nur für ganz kleine diffuse Herde. Selbst die kleinsten Resektionswunden brauchen für eine röntgenologisch feststellbare restitutio ad integrum 6 und mehr Monate. Wenn ich meine Röntgenaufnahmen anhand dieser Regel beurteilen würde, so könnte ich nur von sehr wenigen Erfolgen sprechen. Ich betrachte aus diesen Gründen diejenigen Fälle als günstig, bei denen eine deutliche, röntgenologisch feststellbare Knochenapposition anzutreffen ist, negativ dagegen die Fälle mit unverändert gebliebenem Granulom. Von 59 behandelten Zahneinheiten, nach einer Kontrollzeit von 8 bis 12 Monaten, sind 54 zur Kontrollaufnahme erschienen.

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Röntgenkontrolle zusammengefaßt:

Anz. der Fälle	Röntgenbefund	Wurzelfüllung	
12	keine Ausheilung, kein Zeichen von Knochenanbau	9 gute	3 schlechte
13	geringe Knochenbildung	8 gute	5 schlechte
17	deutlich feststellbare Knochenbildung, starke Verkleinerung des Herdes	20 gute	5 schlechte
8	völliges Verschwinden des Granulomes		

5 Zähne waren vor der Behandlung ohne Herd, 5 Patienten sind zur Kontrolle nicht erschienen.

Als schlechte Wurzelfüllung verstehen wir eine undichte, mit Luftblasen durchsetzte, nicht bis zum Apex reichende oder sogar transapikal geschobene Wurzelfüllmasse.

Tabellarische Zusammenfassung der behandelten Fälle

Nr.	Zahn	I ₁	I ₂	Zusatz	Wurzel- füllung	Herd	Kontroll- zeit	Röntgen- befund
1	—6	12	10	NaOH	Z.G.	++	14 M.	+
2	+4	12	10	NaOH	Z.G.	+	11 M.	++++
3	+5	12	10	NaOH	Z.G.	+	11 M.	++++
4	3+	—	12	NaOH	Z.G.	++	12 M.	+—
5	—5	10	3	NaOH	Z.G.	++	Parulis, Extraktion	
6	1—	12	—	NaOH	Z.G.	++	14 M.	—
7	+3	10	6	NaOH	Z.G.	+	12 M.	—
8	—4	8	—	NaOH	Z.G.	+	12 M.	—+
9	3+	12	—	NaOH	Z.G.	+	13 M.	+
10	5+	12	—	—	Z.G.	+	12 M.	+
11	4—	12	16	NaOH	Z.G.	+	12 M.	+
12	+2	12	—	NaOH	Z.G.	+	12 M.	++
13	4—	10	—	—	—	Parulis, nicht mehr erschienen		
14	4—	12	—	NaOH	P.G.	+	12 M.	+
15	2+	10	8	NaOH	Z.G.	++	9 M.	+
16	+2	—	—	—	P.G.	+	z. Kontr. nicht ersch.	
17	6+	20	20	NaOH	Z.G.	+++	8 M.	+
18	3—	14	—	NaOH	W ₁	Parulis, nicht mehr erschienen		
19	1+	15	20	NaOH	Z.G.	+	13 M.	++++
20	1+	15	15	NaOH	Z.G.	++	12 M.	+
21	5+	10	16	NaOH	Z.G.	+	7 M.	—
22	+3	15	15	NaOH	Z.G.	++	10 M.	+
23	+2	15	15	NaOH	Z.G.	++	12 M.	++
24	—4	20	—	NaOH	Z.G.	++	8 M.	—
25	2+	30	30	NaOH	W ₁	++++	9 M.	++
26	—4	30	8	NaOH	Z.G.	++	12 M.	++++
27	5+	20	—	—	Ca	++	Stromableitung!	
28	2+	25	—	—	Z.G.	+	10 M.	—
29	3+	14	14	NaOH	Z.G.	++	11 M.	++++
30	1+	12	8	NaOH	Z.G.	++	9 M.	++
31	2+	15	10	NaOH	Z.G.	+++	9 M.	++
32	+3	12	10	NaOH	Z.G.	+	9 M.	++++
33	+3	15	15	NaOH	Z.G.	+++	10 M.	++
34	+2	15	15	NaOH	Z.G.	++	5 M.	—
35	—1	20	20	NaOH	Z.G.	++++	6 M.	++
36	1—	20	20	NaOH	Z.G.	++++	6 M.	++
37	2+	14	14	NaOH	Z.G.	+++	6 M.	+
38	+3	14	14	NaOH	Z.G.	++	z. Kontr. nicht ersch.	
39	—1	15	15	NaOH	Z.G.	++	Extr. weg. Paradent.	
40	—3	15	15	NaOH	Z.G.	++	9 M.	+
41	5—	12	15	NaOH	Z.G.	+++	6 M.	+
42	4—	8	10	NaOH	Z.G.	++	6 M.	+
43	3+	12	8	NaOH	Z.G.	+++	7 M.	++

Nr.	Zahn	J ₁	J ₂	Zusatz	Wurzel- füllung	Herd	Kontroll- zeit	Röntgen- befund
44	1+	10	12	NaOH	W ₁		6 M.	ohne Herd
45	+2	8	8	NaOH	Z.G.	++	7 M.	+
46	+1	10	14	—	Z.G.	++	7 M.	+
47	6+	10	12	—	W ₁	+++	7 M.	++
48	+3	—	15	NaOH	Z.G.	++	7 M.	++++
49	+5	6	8	NaOH	W ₁		7 M.	ohne Herd
50	+5	10	10	NaOH	Z.G.	++	7 M.	++++
51	+2	16	12	Ca	W ₁	+	7 M.	—
52	1+	10	16	NaOH	Z.G.	++	7 M.	— (*)
53	+3	20	15	Ca	W ₁	++	7 M.	+—
54	3+	10	8	—	W ₁		7 M.	ohne Herd
55	+2	12	12	—	W ₁	++	z. Kontroll. nicht ersch.	
56	4—	10	10	—	W ₁			ohne Herd
57	5—	8	10	NaOH	Z.G.	+	7 M.	+—
58	—4	8	10	NaOH	W ₁		7 M.	ohne Herd
59	5+	10	8	NaOH	W ₁	++	10 M.	+—

I₁ — Stromdosis in mA/min, die mit dem Kanalinhalt als Elektrolyt appliziert wurde.

I₂ = Stromdosis in mA/min, die nach Erweiterung und Reinigung des Kanals appliziert wurde.

Zusatz = OH-Ionenspender, der im Kanal gelegt wurde, um die J₂ durchführen zu können (Ca = Kalxyl).

Wurzelfüllung = Wurzelfüllung mit

Z.G. = Zement und Guttastift

P.G. = Paraffin und Guttastift

W₁ = Chlorphenolkampfermentholjodoformpaste.

Die Kontrollzeit ist in Monaten = M. angegeben.

Die +-Zeichen in der Kolonne «Herd» schildern die Größe des Herdes vor der Behandlung, die +- und — Zeichen in der Kolonne Röntgenbefund geben das Ausmaß der röntgenologisch festgestellten Knochenneubildung an. ++++ bedeutet Ausheilung.

C. Bakteriologische Untersuchungen

a) Die bakteriologischen Anfangsversuche

Über die Bakteriologie der infizierten Wurzelkanäle und Granulome sind bereits weitgehende Untersuchungen gemacht worden, so daß ich es für überflüssig finde, sie nochmals hier in Form einer Zusammenfassung zu wiederholen (*Castagnola*¹⁾).

Allgemein möchte ich zuerst betonen, daß für alle Phantom- und Patientenversuche nur unbehandelte Gangranzähne genommen wurden, um den Einfluß medikamentöser Ionen auszuschalten.

I. 15 gangränöse Zähne wurden durch eine Wachsplatte an einem mit Gelatine gefüllten Gefäß fixiert. In das Kavum legte ich die negative Elektrode, die Gelatinemasse wurde positiv gepolt. Vor dem Einschalten des Stromes wurde mit einer sterilen, gezahnten Nadel der kronenwärts gelegene Anfangsteil des Wurzelkanalinhaltes entfernt und in Traubenzuckerbouillon geimpft. Mit einer frischen Nadel als aktiver Elektrode wurde dann die Ionophorese ausgeführt, und zwar mit einer Stromstärke zwischen 2 und 3 mA min für eine Dauer von 5 Minuten, so daß im gesamten eine Dosis von 10 bis 15 mA min appliziert wurde. Nach der Behandlung wurde mit einer frischen, sterilen Nadel der Kanalinhalt entfernt und ebenfalls in Traubenzuckerbouillon überimpft. Beide Röhrehen kamen dann für eine Dauer von 72 Stunden in den Brutschrank.

Ergebnisse: Alle Röhrehen, die vor der Behandlung mit Kanalinhalt überimpft wurden, zeigten eine starke Trübung. Zeichen des Bakterienwachstums; die anderen, die nach der Behandlung überimpft wurden, zeigten völlige Sterilität.

II. Bei 5 Zähnen der oben erwähnten Gruppe, die samt Granulom extrahiert werden konnten, wurde nach der Behandlung das Granulationsgewebe mit sterilen Instrumenten abgetragen und in Bouillon bebrütet. Nach 72 Stunden zeigten die Röhrehen ein Bakterienwachstum.

III. Das gleiche wurde bei 10 einwurzigen Zähnen in vivo ausgeführt. Nach Anlegen des Kofferdams und dreimaligem Abjoden wurde die Pulpakammer eröffnet und mit sterilen Instrumenten wie bei den Phantomversuchen vor und nach der Ionophorese von 10 bis 12 mA/min überimpft. Gleich wie an den extrahierten Zähnen waren alle Röhrehen vor der Behandlung infiziert und nach der Behandlung steril.

IV. Wir überlegten uns dann die Möglichkeit der Reinfektion dieser keimfreien Kanäle. Um diese Frage abzuklären, legte ich, nach Räumung und Erweiterung mit sterilen Kautelen zweier behandelter Kanäle, eine sterile Watteeinlage, die möglichst apexnahe geschoben wurde. Nach 3 Tagen entfernte ich die Einlage unter Kofferdam und mit allen notwendigen Maßnahmen, um eine Ver-

unreinigung zu verhüten, und brachte sie in Traubenzuckerbouillon. Nach 72 Stunden im Brutschrank zeigten beide Röhrchen die deutlichen Zeichen der Infektion. Man muß an dieser Stelle erwähnen, daß beide Zähne granulomtragend waren.

V. Aus dem vorigen Versuch glaubte ich den Schluß ziehen zu können, daß bei den von *Bernard* angegebenen Stromdosen die bakterizide Wirkung das Granulom nicht zu erreichen vermochte, so daß infolge Sekretion der Kanal reinfiziert werden kann. An zwei granulomtragenden, unteren Frontzähnen wiederholte ich den Versuch, aber mit erhöhter Stromdosis. Immer mit sterilen Kautelen wurden beide Zähne eröffnet und separat durch 40 mA/min behandelt; der Kanalinhalt wurde entfernt, weiter wurden die Kanäle bis Kerr 5 erweitert. Der Kanalinhalt wurde in Bouillon 72 Stunden bebrütet mit bakteriologisch negativem Resultat. In die gereinigten Kanäle pumpte ich mit einer sterilen Pipette Traubenzuckerbouillon. Ich verschloß dann ohne Druckanwendung zuerst mit mehrmals abgeflammter Guttapercha, dann mit Zement. Nach 7 Tagen wurden die Zähne unter sterilen Maßnahmen geöffnet und die winzige Menge Bouillon in ein ebenfalls mit Traubenzuckerbouillon gefülltes Reagenzglas gebracht. Nach 72 Stunden Bebrütungszeit zeigten beide Röhrchen eine kaum feststellbare Trübung. Es ist aber schwer, eine absolute Garantie für eine sterile Entnahmetechnik aufstellen zu können.

VI. Ich befaßte mich weiter mit der Frage des Eindringungsvermögens dieser freigewordenen OH-Ionen in die Dentinkanälchen. Wie früher schon erwähnt, sind die Forscher noch nicht einig über die Frage der Tiefe der Dentininfektion. Da aber mit Sicherheit mit einer solchen bei der Gangrän immer zu rechnen ist, führte ich folgenden Versuch durch: Zwei frisch extrahierte Gangränzähne wurden mit 20 mA/min behandelt. Die Wurzeloberfläche wurde dann mit Alkohol abgewaschen und abgeflammt, dies, um die bei der Extraktion auf der Wurzeloberfläche haftenden Bakterien zu eliminieren. Mit einem sterilen Rosenbohrer wurden dann an verschiedenen Stellen der Wurzeloberfläche Richtung Kanal Löcher gebohrt und das daraus gewonnene Dentinpulver in sterilen Uhrschildchen aufgenommen. Ich teilte zu diesem Zweck den Wurzelquerschnitt in 3 Zonen, eine äußere, eine mittlere und eine innere (Fig. 3). Um eine Erhitzung des Rosenbohrers zu vermeiden, wurde

mit großer Vorsicht und ohne Druck gearbeitet. Das gewonnene Dentinpulver wurde aerob in Traubenzuckerbouillon und anaerob in Liborius bakteriologisch untersucht. Da *Prader*⁴⁴ vor den Schwierigkeiten der Bakterienkultur aus Dentinpulver in kurzer Beobachtungszeit warnt, wurden die Röhrchen 7 Tage im Brutschrank belassen.

Ergebnisse:

1. Der nach der Ionophorese bakteriologisch untersuchte Kanalinhalt zeigte völlige Sterilität.
2. Die äußere Schicht a, die mit Alkohol abgeflammt wurde, zeigte keine Infektion.
3. Die mittlere Schicht b wurde ebenfalls bakterienfrei befunden.
4. Die innerste Schicht c, die die Kanalwand bildet, zeigte eine leicht anaerobe Infektion.

b) *Die bakteriologischen Schlußversuche*

Von verschiedener Seite wurde die Wirkung der OH-Ionophorese auf pathogene Keime als eine Bakteriostase angesehen, so daß nach Abklingen der Alkalinitätswerte infolge Diffusion und Pufferung die Bakterien wieder lebens- und teilungsfähig sein könnten.

Eine weitere Kritik bezweifelt in den Fällen mit tiefreichender Dentininfektion, daß die OH-Ionen auch in der Tiefe der Dentinkanälchen ihre schon an und für sich fragliche bakteriostatische Wirkung entfalten können. Um diese Wirkung mit unseren Maßnahmen möglichst zu unterstützen, applizierte ich eine zweite Ionophorese nach einer gründlichen Ausräumung und mechanischen Erweiterung der Wurzelkanäle.

Um diese beiden Probleme zu prüfen, wurde nach einer Zeit von etwa 9 Monaten von 16 Zahneinheiten die kanalnahe Dentinwand bakteriologisch geprüft. Der Zahn wurde unter Kofferdam gelegt und dreimal abgejodet. Mit sterilen Instrumenten wurde die Pulpa-kammer und längs der bei der Füllung eingelegten Guttaspitze der Kanal wieder eröffnet. Mit der gleichen Kernnadeldicke, die ich bei der Erweiterung gebraucht hatte, versuchte ich die Zementmasse zu entfernen. Mit einem sterilen dicken Beutelrockbohrer wurde dann der Wurzelkanal erweitert, so daß der daraus gewonnene Dentinstaub in einem sterilen Uhrschildchen aufgefangen werden konnte. Zu diesem Zweck kamen natürlich nur Oberkieferzähne in Betracht.

Der Dentinstaub wurde in Traubenzuckerbouillon zum Aerobier-
nachweis und in Liboriusagar zum Anaerobiernachweis überimpft.
Beide Proben blieben 6 Tage im Brutschrank.

Ergebnisse: In den meisten Fällen war bei der Eröffnung des Ka-
nales der typische faule Gangrängeruch wahrnehmbar, was sicher
gegen die Behauptungen *Bernards* betreffend Spaltung und Ent-
giftung der organischen Zersetzungsprodukte zu einfachen Amino-
säuren spricht.

In der folgenden Tabelle sind die Resultate der bakteriologischen
Schlußversuche zusammengefaßt.

Nr.	Zahn	I ₁	I ₂	Beob.-Zeit	Bakt.-Bfd.	Rö-Bfd.
11	4—	12	16	12 Monate	—	+++
9	3+	12	—	13 Monate	+	+
48	+3	*	15	9 Monate	—	+++
52	1+	10	16	9 Monate	—	
45	+2	8	8	9 Monate	+	++
12	+2	12	—	12 Monate	—	++
37	2+	14	14	8 Monate	—	+
46	+1	10	14	8 Monate	—	+
22	+3	15	15	10 Monate	—	+
43	3+	12	8	9 Monate	+	++
28	+2	25	—	10 Monate	+—	—
31	2+	15	10	9 Monate	—	++
32	+3	12	10	9 Monate	—	+++
4	3+	12	—	12 Monate	+	+—
20	1+	15	15	12 Monate	—	+
25	1—	10	8	9 Monate		

N. = Ordnungszahl bei der tabellarischen Zusammenfassung.

I₁ = Erste Ionophorese mit dem nekrotischen Kanalinhalt als Elektrolyt.

I₂ = Zweite Ionophorese nach mechanischer Erweiterung und Reinigung des
Wurzelkanals.

Die bakteriologische Nachkontrolle ergab somit in 5 Fällen eine
bestehende aerobe und anaerobe Dentininfektion, in allen 11 Fällen
war das untersuchte Dentinpulver keimfrei. Stichproben aus den
infizierten Röhren enthielten Staphylo-, Strepto- und Entero-
kokken.

Kritisch kann man zu diesen Ergebnissen bemerken, daß die Do-
sierung in den Fällen, die noch infiziert gefunden wurden, relativ

schwach war (Fall 9, 45, 4). In den Fällen 4, 12, 28 und 9 ist nur eine Applikation gemacht worden, um die Zweckmäßigkeit der zweiten Ionophorese nach der mechanischen Erweiterung zu prüfen. Das mechanische Entfernen der nekrotisch zerfallenen Dentinmasse an der Kanalwand soll das Eindringen der OH-Ionen in die Dentinkanälchen begünstigen. *Abt*¹², der den Transport von Cibazolionen in das Dentin bis zur Dentinzementgrenze durch Färbung von Zahnschliffen bewiesen hat, berichtet, daß sklerosierte Dentinbezirke, wie sie an der Kanalwand der Gangränzähne anzutreffen sind, farblos geblieben sind. Daraus die Notwendigkeit der mechanischen Entfernung der Kanalwand vor der zweiten Ionophorese. Weiter kann noch in diesem Zusammenhang hervorgehoben werden, daß eine relative Sicherheit betreffend Dentinsterilisation nur mit Stromdosen über 20 mA/min erreicht werden kann.

D. Histologische Untersuchungen

Untersuchtes Material: Aus den 59 mit Ionophorese behandelten Zähnen wählten wir deren 13, die sich für eine Resektion eignen könnten. Dazu mußten wir folgende Faktoren in Betracht ziehen:

1. Die Wurzel muß eine gewisse Länge aufweisen, und die Wurzelspitze muß den andern nicht zu nahe liegen.
2. Die Wurzelfüllung soll den ganzen Kanal gut abschließen.
3. Der Patient im allgemeinen und die Gebißverhältnisse im speziellen sollen durch die Resektion keine nachteiligen Folgen haben.

Wir bemühten uns, im Rahmen des Möglichen diejenigen Zähne zu reseziieren, die in den nächsten Jahren voraussichtlich aus prophethischen Gründen entfernt werden sollten.

Resektionstechnik: Die betreffende Kieferpartie wurde durch Leitungsanästhesie unempfindlich gemacht, das Operationsgebiet durch Jodanstrich, im Rahmen des Möglichen, desinfiziert. Nach der Inzision wurde der Schleimhautperiostlappen hochgehoben, durch einen speziellen Trepanbohrer zylindrischer Form wurde, unter physiologischem Kochsalzspray, um eine Überhitzung zu vermeiden, Wurzelspitze, Granulom und das umliegende Knochengewebe in einem Stück entfernt. Der Wurzelkanal wurde dann retrograd mit Cu-Amalgam verschlossen, der Schleimhautperiostlappen durch Nähte reponiert.

Das so gewonnene Resektionsgut wurde sofort in 10% Formalinlösung fixiert.

Histologische Untersuchungsmethode: Nach der Fixierung in 10% Formalin wurde das Resektionsgut in 5% Salpetersäure entkalkt. Der Entsäuerung, durch 5% Natriumsulfat, folgte eine Waschung mit Brunnenwasser. Die Präparate wurden dann mit CO₂-Schnee gefroren, geschnitten und mit Hämatoxylin-Eosin gefärbt.

Resultate: In keinem der 11 zur Untersuchung gelangten Präparate konnte man eine eindeutige Knochenbildung wahrnehmen. Die Infiltration der periapikalen Gewebe mit Entzündungszellen ist in allen Fällen noch vorhanden.

Die Desinfektion eines Seitenkanals (siehe Präparat 4) ist, trotz Ionophorese, nicht gelungen.

An einem Patienten wurden ein Zahn mit der Ionophorese- und ein anderer mit der Walkhoffmethode behandelt: Der Vergleich beider Behandlungsarten bei gleicher individueller Reaktion hat bei der Walkhoffmethode zum besseren Resultat geführt (Präparat 8 und 13).

Im folgenden sind die histologischen Präparate einzeln besprochen. Bei der in der Legende der Präparate angegebenen Stromdosis ist die erste Zahl die Quantität der Ionophorese mit dem Kanalinhalt als Elektrolyt, die zweite diejenige nach Erweiterung und Reinigung des Kanales, mit Zusatz von verdünntem NaOH.

5. Schlußbetrachtung

1. Die Ionophorese ist nach wie vor ein unsicheres therapeutisches Verfahren, bei dem wir die Durchtrittsstelle des Ionenstromes nicht bestimmen oder kontrollieren können.

2. Die OH-Ionophorese erlaubt bei der ersten Sitzung einer Gangränbehandlung die vollständige Ausräumung des Kanals und die Perforation des Apex, dank der schnellen Desinfektion des nekrotisch zerfallenen und infizierten Kanalinhalt.

3. Die gute schmerzlindernde Wirkung der OH-Ionophorese bei den akuten Fällen wird von uns bestätigt.

4. Eine Dentindesinfektion ist durch Stromdosen von 20 mA/min und mehr möglich, aber nicht sicher. Die mechanische Erweiterung und Reinigung des Kanals ist notwendig.

5. Bei Anwendung von Stromdosen bis zu 30 mA·min konnte man keine Schädigung im periapikalen Gewebe histologisch nachweisen.

6. Die Röntgenkontrolle ergab in den meisten Fällen eine Verkleinerung des Granuloms. Auffallend ist aber das Fehlen der reparativen Knochenneubildung. Wir konnten die Behauptung *Bernards*, daß ein Granulom nach Ionophoresebehandlung in einem Maximum von 6 Monaten röntgenologisch ausheilen muß, nicht bestätigen.

7. Die histologische Kontrolle ergab in fast allen Fällen eine weiter bestehende, entzündliche Infiltration des periapikalen Gewebes und keine Knochenneubildung.

8. Die Ausheilung der Granulome in Form einer Granulomfüllung mit Jodoformpaste war besser als mit OH-Ionophorese. Die reparationsfördernde Wirkung der OH-Ionophorese konnte weder durch unsere Röntgenkontrolle noch durch histologische Präparate in gewünschtem Umfang festgestellt werden.

9. Die OH-Ionophorese ist keine schnellere und einfachere Methode der Wurzelbehandlung. Sie verlangt exakte Arbeitsweise und eine zeitraubende Vorbereitungs- und Durchführungsphase.

10. Die Frage der Wurzelfüllung ist auch bei Anwendung der OH-Ionophorese nicht gelöst. Alle diejenigen Kanalteile und Ramifikationen, die nicht bakteriendicht abgeschlossen werden können, können sich reinfizieren und wirken weiter als kryptogene Infektionsquellen.

11. Zusammenfassend: Die OH-Ionophorese, nach unseren Untersuchungen, eignet sich gut bei der Eröffnung und Ausräumung eines unbehandelten, infizierten Wurzelkanals (1. Sitzung) und bei akuten periapikalen Prozessen, gibt aber bei der Behandlung der infizierten Wurzelkanäle und der Granulome nicht die prozentual hohen Heilungsergebnisse, wie sie in der Literatur angegeben werden.

An dieser Stelle möchte ich noch meinem hochverehrten Lehrer und Chef, Herrn Professor Dr. med. W. Heß, für seine wertvolle Hilfe und das mir entgegengebrachte Interesse meinen herzlichsten Dank aussprechen. Ebenso danke ich Herrn Oberassistent Dr. L. Castagnola für seine interessanten und lehrreichen Anregungen. Herrn Dr. Kriwaczek von der Pharmachemie AG danke ich verbindlich für seine Unterstützung bei der Ausführung meiner Arbeit.

6. Literaturverzeichnis

1. *Castagnola*: Untersuchung über die abtötende Wirkung einiger neuerer Medikamente auf die Gangränbakterien des Wurzelkanals mittels Ionophorese. Diss. Zürich 1946. SMfZ, 5; 1946.
2. *Pont*: La cataphorèse en art dentaire. Thèse Lyon 1899.
3. *Tritschler*: Die Elektrophorese in der Zahnheilkunde. Deutsche Zahnheilkunde, 57; 1923.
4. *Bernard*: L'ionophorèse dentaire. Thèse Lyon 1929.
5. *Kellner*: Ist die Ionophorese ein wirksames Verfahren? ZfStom.; 1936.
6. *Bleichsteiner*: Elektrosterilisation bei Gangränbehandlung. ZfStom.; 1937.
7. *Bleichsteiner*: Die Verwendung der Doppelelektrode nach Ostiller. ZfStom.; 1937.
8. *Adler und Pace*: Über eine neue Elektrodenanordnung zur Wurzelbehandlung mit Gleichstrom. ZfStom.; 1938.
9. *Prader*: Die Indikation zur Ionophorese. SMfZ.; 1939.
10. *Schenker*: Die Iontophorese in der Gangränbehandlung der Zähne. Diss. Zürich 1939. SMfZ, 9; 1939.
11. *Schudel*: Klinische und histologische Untersuchungen von Granulomen nach Iontophorese-Behandlung mit Jodjodkali und Cibazol. Diss. Zürich 1942. SMfZ, 4; 1942.
12. *Abt*: Experimentelle und histologische Untersuchungen von Granulomen nach Iontophoresebehandlung mit Cibazol und nachfolgender Granulomfüllung. Diss. Zürich 1943. SMfZ, 3; 1944.
13. *Martinet*: Contribution à l'étude du borate de phényl-mercure en odontostomatologie. Diss. Genf 1941.
14. *Schacke*: Neue Untersuchungen über Iontophorese. ZfStom.; 1939.
15. *Holzach*: Über die Behandlung der Pulpagangrän nach der Methode von Bernard. ZfStom.; 1938.
16. *Forster*: Elettrosterilizzazione dei canali radicolari. StomIt.; 1939.
17. *Müller*: Dentin- und Granulomsterilisation. SMfZ.; 1942.
18. *Heß*: Die Behandlung der dentalen Herdinfektion durch Iontophorese mit Cibazol. SMfZ.; 1942.
19. *Heß*: Die Cibazoltherapie in der Zahnheilkunde. SMedW.; Sondernummer.
20. *Heß*: Die Iontophorese in der Gangränbehandlung. DZW; 1943.
21. *Fuchs*: Resultate bakteriologischer Untersuchungen von Dentin und umgebendem Zahngewebe bei gesunden, infizierten und behandelten Zähnen. Diss. Zürich 1944.
22. *Bernard*: Nouvelle étude sur l'ionophorèse. Odont., 3; 1947.
23. *Wolf*: Wurzelfüllung und Ionophorese. DZZ, 3; 1950.
24. *Wolf*: Über grundsätzliche Anwendung der Ionophorese vor Wurzelfüllung. DZZ, 13; 1950.
25. *Hufnagel*: Vorläufige Mitteilung über unsere bisherigen Erfahrungen mit der Ionophoresebehandlung. ZW, 18; 1951.
26. *Pohl*: Zu praktischen Versuchen mit der Ionophorese nach Bernard. ZW; 9, 1951.
27. *Kristen*: Erfahrungen mit der Hydroxylionophorese bei der Wurzelbehandlung. ZW; 9, 1951.
28. *Hallich*: Stellungnahme eines Praktikers zur Ionophorese. ZW; 12.1951.
29. *Dimmling und Lutz*: Experimentelle bakteriologische Untersuchung über die Wirksamkeit der Hydroxylionophorese. DZZ; 3.1951.

30. *Knappwost*: Vortrag ZGZ, Zürich, April 1952.
31. *Paszner*: Zitiert nach Wolf²⁴.
32. *Vidor*: Über das Wesen der Ionophorese und ihre Anwendung. ZR; 1936.
33. *Büchs*: Klinische Beobachtungen bei der OH-Ionophorese devitaler Zähne. ZR; 5.1.1952.
34. *Rheinwald* und *Mayer*: Zur Wirkungsweise der sogenannten Ionophorese. ZW, 18; 1951.
35. *Scheufele*: Die Ionophorese nach Bernard. ZW; 1950.
36. *Singer*: La ionoforesi jodica e la ionoforesi con il ione accelerato OH in odontoiatria conservatrice. RivItStom., 5; 1951.
37. *Castagnola*: Il trattamento delle parodonti apicali granulomatoze con la Ionoforesi. RivItStom., 9; 1947.
38. *Karczag*: Zitiert nach Dimmling und Lutz²⁹.
39. *Proell*: Über die Bakteriolyse und die Erfolgssicherheit der Ionophorese nach Bernard anhand der bisher von mir behandelten Fälle. ZR; 7.1952.
40. *Heiß* und *Bräse*: Zitiert nach Kristen²⁷.
41. *Greve*:
42. *Walkhoff* und *Miller*: Zitiert nach Engel⁵⁷.
43. *Harndt*:
44. *Prader*: Diagnose und Therapie des infizierten Wurzelkanales. Verlag Benno Schwabe & Co., Basel, 1949.
45. *Lenfant*: L'action médicamenteuse dans ses effets ioniques. Odont., 63; 1950.
46. *Knappwost*: Die Aufgabe des Hydroxylions bei der Ionophorese. ZW; 12.1951.
47. *Schlottmann*: Zitiert nach Proell³⁹.
48. *Heiß*: Betrachtungen zur Biologie der Wurzelbehandlungen im allgemeinen und im besonderen zur Ionophorese. ZR, 2; 1952.
49. *Tietze*: Das Problem der Wurzelbehandlung im Lichte der Atom- und Ionen-theorie. ZW; 5.1948.
50. *Nernst*: Zitiert nach Büchs³³.
51. *Kowarschik*: Zitiert nach Büchs³³.
52. *Kosaka* und *Izawa*: Zitiert nach Büchs³³.
53. *von Gaza* und *Brandi*: Beziehung zwischen H-Ionenkonzentration und Schmerzempfindung. KlinW, 1123; 1926.
54. *Frunder*: Intravitale pH-Messungen. Pflügers Archiv 1948.
55. *Eichholtz*: Lehrbuch der Pharmakologie. Springer-Verlag, Heidelberg; 1947.
56. *Bernard*: Les suites opératoires de l'Ionophorèse. Odont., 636; 1950.
57. *Engel*: Die Behandlung infizierter Wurzelkanäle und Granulome mit der Methode von Walkhoff. Diss. Zürich 1950. SMfZ, 11; 1950.
58. *Büchs*: Bakteriologische Untersuchung zur Desinfektionskraft der OH-Ionophorese. ZR, 6; 1952.
59. *Frunder*: Lokale pH-Änderung des lebenden Gewebes unter Einwirkung chemischer Reizmittel. Pflügers Archiv, 631; 1949.

